
 論 文

大韓造船學會論文集
 第31卷第4號 1994年11月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 31, No. 4, November 1994

선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템(I)

이주성*, 김상일**, 오석진**

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

by

Joo-Sung Lee*, Sang-Il Kim** and Seok-Jin Oh**

요 약

본 논문에서는 선상가열법을 이용한 강판의 곡가공 자동화를 향한 하나의 가능성 있는 방향을 제시하고 있다. 이를 위해 선상가열현상을 대변할 수 있는 역학적 모델을 도입하여 가열조건들이 주어 져 있을 때 가열경로를 구할 수 있는 알고리즘을 소개하였고 이에 의거해서 컴퓨터 프로그램을 개발 하였다. 이의 정당성을 확인하기 위해 개발된 컴퓨터 프로그램을 2가지 형태의 곡면형상에 적용하여 이를 가공할 수 있는 가열경로를 찾는 시도를 해 보았는데, 이로부터 본 논문에서 제안하는 알고리 즘과 프로그램 시스템은 만족할 만한 결과를 주고 있으며, 이는 곡가공 자동화 시스템 구축을 향한 합리적인 길이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper a feasible way toward the automation for plate forming by line heating method is proposed. For this a mechanical model representing the line heating phenomenon is adopted and a reasonable algorithm is introduced to search the heating path under the given heating conditions, which can produce the surface very similar to the given surface. A computer program system has been developed according to the proposed algorithm here. It has been applied to two curved shapes to show its validity. From the results it has been found that the proposed algorithm and the developed computer program system give a good result and can be a possible way getting to the automation system of plate forming by the line heating method.

발 표 : 1993년도 대한조선학회 추계연구발표회('93.11.13)

접수일자 : 1993년 12월 23일, 재접수일자: 1994년 9월 22일

* 정회원, 울산대학교 조선해양공학과

**학생회원, 울산대학교 대학원 조선해양공학과

1. 서론

강관의 곡가공은 선박의 건조공정에서 중요한 위치를 차지하고 있다는 점은 잘 알려져 있다. 중앙부와 같이 곡률의 변화가 일정한 부분이나 그 변화가 크지 않은 부분의 곡가공은 Bending Press를 이용해서 가공하고 있으나, 선수, 선미부와 같이 곡률의 변화가 일정하지 않은 부분은 대개 가스토치(gas torch)를 이용한 선상가열법에 의해 가공하고 있으며, 이 공정은 현재 전적으로 수작업에 의존하고 있다. 강관의 곡가공에는 적지 않은 작업시간이 소요되는 것과 더불어 작업자가 다량의 산소에 노출됨으로 인해서 장시간 작업이 어려운 점이 있다. 현재와 같은 추세라면 지속적인 인건비 상승이 예기되며 현재 숙련자가 되기까지는 2-3년 정도의 훈련기간이 필요한데, 향후 숙련자 확보의 어려움에 대한 예측 등 여러 요인들로 이의 자동화 시스템 개발에 대한 필요성은 이미 국내외적으로 널리 인식되어 있다.

지난 20여년간 선진 조선키국들에서는 곡가공 자동화 시스템의 개발에 많은 관심을 보이면서 많은 실험적, 이론적 연구를 수행하여 왔다[1][6]. 국내에서도 이의 필요성이 최근에 더욱 강조되면서 이 분야에 대한 이론적 연구를 수행한 바 있다[7][8]. 선상가열법을 이용한 곡가공 자동화 시스템은 용접에 의한 초기변형을 제거하는 곡직 자동화에도 유용하게 활용할 수 있는 기술이다[9]. 지난 20여년간 일본, 미국 등에서 수행한 연구와 최근 국내에서 발표된 연구결과를 크게 두 부분으로 나누자면

- (1) 열탄소성 해석에 의한 선상가열의 물리적 현상 규명
- (2) 선상가열 Simulator 개발

이라고 볼 수 있다. 이에는 열원(heat source)이 아세틸렌, LPG, LNG 등의 가스[1-3]인 가스토치를 이용하거나 Laser에 의한 가열장치[4], 고주파 유도가열장치[10]를 활용한 실험적 연구가 병행되었다. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 근본적으로 선상가열의 물리적 현상을 이론적 또는 실험적으로 규명하는 데에 초점이 맞추어졌기에 실무에 담당하는 이들의 욕구를 충족시키기에는 상당한 거리가 있는 실정이다. 한편, 작업자가 숙련자가 되기까지 Simulation을 통해 훈련할 수 있는 선상가열 Simulator가 개발됨으로써 어느 정도 실무현장에서의 욕구를 충족시킬 수 있었다[10][11].

본 논문에서는 선상가열법을 이용한 곡가공의 복잡한 물리적인 현상을 규명하기보다는 그 현상을 대변할 수 있는 역학적 모델을 도입하여 곡가공 자동화 시스템을 구축할 수 있는 하나의 방향을 제안하려고 한다. 따라서 이 논문에서는 100% 완전한 자동화를 꾀하는 것이 아니라, 어느 정도의 공정(예를 들면 80-90% 정도)을 자동화 시스템으로 가공하고 나머지는 수작업으로 마무리짓는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 시스템의 구축은 전술한 바와 같이 현재 곡가공 자동화 시스템에 대한 욕구를 어느 정도 충족시킬 수 있을 것으로 기대되며, 곡가공 공정을 효율적으로 수행할 수 있을 뿐만 아니라 작업환경을 적지 않게 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문에서는 원하는 곡면을 선상가열법을 이용하여 가공할 때 그 가열경로(heating path)를 정의하는 알고리즘을 소개하였고, 이에 의거하여 개발한 프로그램을 2차곡면과 3차곡면에 적용한 예를 보여주었다. 적용 예의 결과에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안하는 방법은 선상가열법을 이용한 곡가공 자동화 시스템의 구축을 향한 하나의 가능성있는 길임을 확인할 수 있다.

2. 곡가공 자동화 시스템의 구성

2.1 개요

Fig. 1은 선상가열법을 이용한 곡가공 자동화 시스템의 개념도를 보여주고 있다. 우선 원하는 곡면을 가공하기 위한 선상가열의 인자들(Fig. 1에서의 system parameters)을 이의 자동화 알고리즘에서 구하게 되고, 이 정보들은 제어 시스템(control system)에 전달되어 작업로봇(working robot)로 하여금 실제 가공 작업을 할 수 있도록 제어하게 될 것이다. 이러한 자동화 시스템의 구축을 위해서는 두뇌에 해당하는 선상가열 자동화를 위한 알고리즘과 이에 의거한 프로그램의 개발 및 그 정당성의 확인이 선행되어야 할 것이다.

2.2 선상가열 인자들의 정의

선상가열에 의한 곡가공의 물리적 현상은 결국 열응력에 의해서 잔류변형이 발생하는 것인데, 이 문제는 이론적으로 열탄소성해석(thermal elasto-plasticity analysis)의 범주에 속하게 된다. Fig. 2(a)와 (b)에서 보듯이 열원이 이동하면서 온도가 높은 부분이 소성현상으로 인해 냉각 후 잔류변형이 생기는 것을 역학적으로는 Fig. 2(c)에서처럼 어떤 양의 굽힘모멘트, M 이 작용해서 굽힘변형을 일으키는 것으로 모델링할

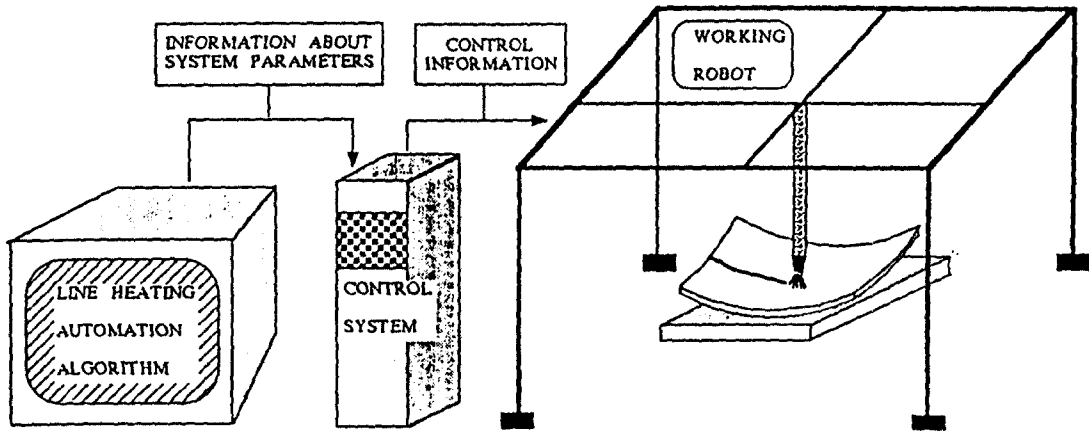


Fig. 1 Concept of line heating automation system

수 있겠다. 이 때 선상가열의 결과 즉, 굽힘변형의 크기에 영향을 주는 인자들은 많이 있을 수 있는데, 대체로

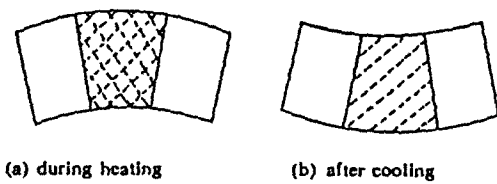
- (1) 열원의 종류
- (2) 열원의 온도
- (3) 열원의 속도
- (4) 판의 재료적 특성치
- (5) 판의 두께와 기하학적 형상
- (6) 냉각방법

등을 들 수 있겠고, 이외에도 실제로 밝혀지지 않은 많은 인자들이 포함될 것이다. 아마 유한요소법이나 유한차분법 등 수치해석법을 이용한 복잡한 열탄소성 해석을 수행한 결과가 실험과 비교해서 적지 않은 오차를 보이는 것은 이러한 밝혀지지 않은 많은 인자들의 영향으로 추측된다.

선상가열에 의한 굽힘변형형상에 대해 Fig. 2(c)와 같은 역학적 모델을 도입하고, 단위길이당 작용하는 굽힘모멘트를 M_0 라고 하면, 미지의 인자들의 영향을 무시할 때, M_0 는 개념적으로 위에서 열거한 6개의 시스템 인자들의 함수로 정의될 것이다. 한편 열원의 종류, 재료적 특성치 그리고 냉각방법이 정해져 있다면, 인자의 수는 3으로 줄어들고 또한 판의 기하학적 형상의 영향이 그리 크지 않다는 점을 고려한다면, 단위길이당 굽힘모멘트, M_0 는 개념적으로

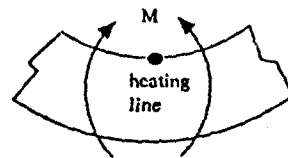
$$M_0 = F(T, v, t) \quad (1)$$

와 같이 정의할 수 있다. 여기에서 T 와 v 는 열원의 온도와 이동속도이고, t 는 판의 두께이다.



(a) during heating

(b) after cooling



(c) bending moment around heating line

Fig. 2 Mechanical modelling of line heating phenomenon

2.3 가열경로를 구하는 알고리즘

전절의 식 (1)로 주어진 굽힘모멘트 M_0 가 합리적으로 결정된다 하더라도, 원하는 곡면을 얻을 수 있는 가공을 위해서 가장 중요한 것은 열원의 이동경로 즉, 가열경로를 정의하는 것이 될 것이다. 본 논문은 이 점에 초점을 맞추어, 판의 기하학적 형상, 열원의 온도와 속도 그리고 M_0 가 주어졌을 때, 원하는 곡면을 얻기 위한 가열경로를 찾는 것에 주안점을 두었다. M_0 는 실험으로부터 도출된 값을 이용하는데, 이렇게 함으로써 이론적 접근방법에서 고려하지 못했던 미지 인자들의 영향을 함축적으로 반영시킬 수 있다.

원하는 곡면을 얻을 수 있는 가열경로를 찾는 데 있어서 중요한 점 중 하나는 추정된 곡면이 원하는 곡면 즉, 주어진 곡면에 얼마나 닮았는가의 척도를 정의하

는 것이다. 여기에서는 그 닮은 정도를 "유사성(similarity)"이라 하였고, 다음으로 주어지는 식 (2)로 정의하였다.

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

$$d_{ij} = \frac{g_{ij} - c_{ij}}{g_{max}}$$

여기에서 δ 는 "유사성", N_x, N_y 는 Fig. 3에서 보인 x와 y방향으로의 격자점(grid point)의 수이고 N_T 는 격자점의 총수이다. g_{ij} 와 c_{ij} 는 격자점 (i,j)에서의 주어진 곡면의 변위와 추정된 곡면의 변위이고, g_{max} 는 모든 i와 j에 대한 g_{ij} 의 최대값이다. 식 (2)에서 보듯이 δ 이 1.0에 가장 접근하는 가열경로를 구하는 것이 이 연구의 주된 사항인데, 물론 이는 가공의 정도를 의미하는 것은 아니나 이와 밀접한 관계가 있다고 말할 수 있겠다.

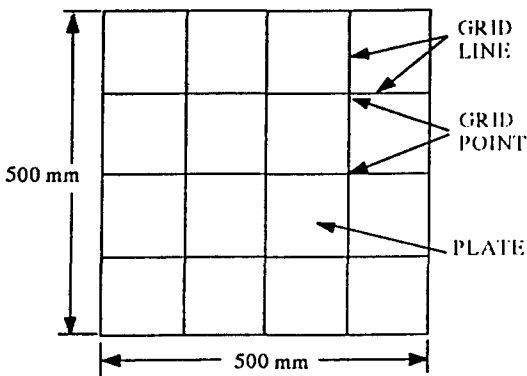


Fig. 3 Grid lines and grid points

가열경로는 Fig. 4에서 보인 것처럼 주어진 판에 적절한 모양으로 가열선소(heating segment)를 정의하고 유사성, δ 가 최대가 되는 가열선소의 수열로서 정의된다.

가열경로를 정의하는 알고리즘은 구조시스템의 안전성 해석에서 파괴경로(failure path)를 정의하기 위해 적용된 알고리즘인 Branch & Bounding Technique[12]과 유사하고, 이는 판의 기하학적 형상 그리

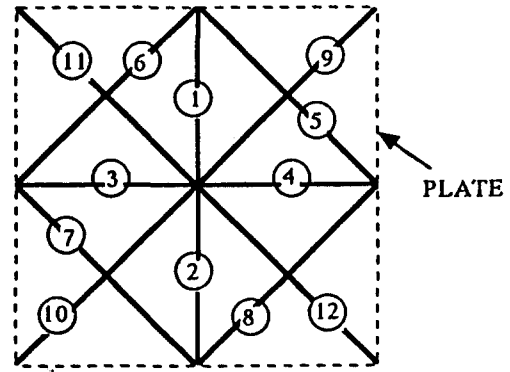


Fig. 4 Heating segments

고 가열조건으로서 열원의 온도와 속도 즉, 단위길이당 굽힘모멘트 M_0 가 주어졌을 때, 원하는 곡면을 가공하기 위한 가열경로를 정의하는 것이다. 본 연구의 알고리즘은 다음과 같이 4개의 단계로 구성된다.

- 단계 1 : 가열할 선소를 선정
- 단계 2 : 유한요소의 분할과 구조해석
- 단계 3 : 격자점에서의 변위 계산
- 단계 4 : 유사성, δ 계산

위의 과정들은 요구되는 유사성을 만족하는 가열경로가 구해질 때까지 반복하게 된다.

여기에서 개발된 곡가공 자동화 시스템에서의 구조해석은 판요소를 이용한 3차원 박판구조의 구조해석을 위한 유한요소프로그램을 사용하였고[13], 요소는 이의 자동분할과정을 거쳐서 생성되는데, 가열선 주위에 있는 요소의 크기를 작게 하기 위해서 국부재분할기법을 적용하였다[14][15]. 요소분할의 한 예로서 Fig. 5

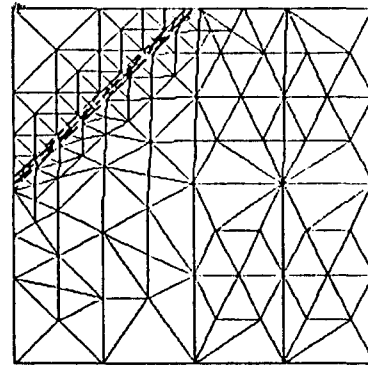


Fig. 5 Example of mesh generation

는 가열선이 판의 좌측상단 대각선 상(Fig. 4에서 가열선소 6번)에 있을 때 요소의 분할된 형상을 보여준다. 일반적으로 격자점과 절점의 위치가 다르므로 어느 격자점에서의 변위는 그 격자점 주위에 있는 절점들의 변위들을 보간해서 추정하였다.

3. 개발된 프로그램의 적용 예

전절에서 기술한 본 연구의 선상가열 자동화 시스템을 위한 알고리즘에 의거하여 개발한 프로그램을 여기에서는 편의상 ALAS(Algorithm for Line heating Automation System)라고 하였다.

3.1 대상곡면

ALAS를 적용한 예를 보여주기 위하여, Fig. 6과 Fig. 7에 보인 안형곡면(pillow shape)과 심형곡면(saddle shape)을 선택하였다. 이들은 각각 2차곡면(2nd order curved surface)과 3차곡면(3rd order curved surface)의 전형적인 예에 해당될 것이다. Fig. 6에서 굵은 실선은 가열선이고, 이 곡면은 실험을 통해 얻은 것으로서 ALAS에 의한 결과를 실험결과와 비교할 목적으로 선택하였다.

3.2 단위길이당 굽힘모멘트

가열선 근처에 작용시키는 단위길이당 굽힘모멘트 M_0 의 값은 2.2절에서 기술한 바와 같이 판의 기하학적 형상과 열원의 온도와 속도에 따라 달라진다. 단위길이당 굽힘모멘트, M_0 를 도출하기 위해 울산대학교 조선 및 해양공학과에서 판의 두께, 열원의 속도 등을 변화시켜가면서 선상가열실험을 수행한 바 있는데 [16], 실험모델 및 실험조건 등을 Table 1에 열거하였

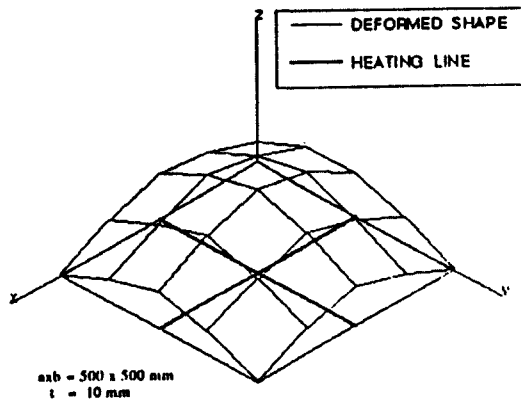


Fig. 6 Pillow shape

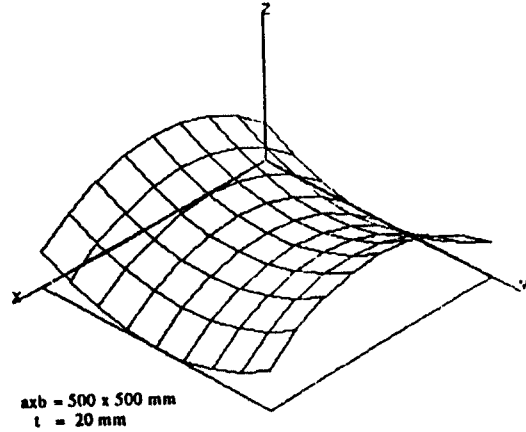


Fig. 7 Saddle shape

다. 선상가열실험 실험결과 중 판 두께가 10mm, 20mm인 경우만을 Table 2에 열거하였는데, 실험모델의 수는 많지는 않지만, Fig. 6과 7의 곡면형상에 대한 가열조건과 단위길이당 굽힘모멘트를 Table 3과 같이 도출할 수 있겠다. 실제로 Fig. 6의 안형곡면은 토치의 온도 $T = 760^{\circ}\text{C}$ 이고 속도 $v = 320\text{mm}/\text{min}$ 인 조건에서 실험한 결과이지만, Table 3에 열거한 굽힘모멘트의 값을 이용하여, 본 연구의 알고리즘을 적용하였다.

Table 1 Models and conditions for line heating test

(a) test plates

dimension : 500×500
thickness : 10, 20, 30, 40mm
nominal yield stress : 235N/mm ²
nominal elastic modulus : 206000N/mm ²

(b) test condition

heat source : oxygen acetylen
cooling method : air cooling

3.3 결과 및 검토

우선 Fig. 6에 보인 안형곡면을 Table 3에 주어진 가열조건을 이용하여 가공할 수 있는 가열경로를 구하기 위해 Fig. 4와 같이 12개의 가열선소를 정의하였고, ALAS에 의한 결과를 Fig. 8에 보여주었다. 이 그림에서 보듯이 가열선을 중심으로 Knuckle형태가 얻어지는데, 이는 역학적 모델링에서 기술한 바와 같이 가열선 주위에 집중모멘트가 가해지기 때문이다. 주어

Table 2 Test results

model no.	t (mm)	T (°C)	v (mm/min)	M ₀ (MN-m/m)
Al-1	10.31	760	320	0.0084
Al-2	10.30	760	320	0.0138
Al-3	10.23	760	195	0.0101
Al-4	10.14	760	195	0.0092
Al-5	19.90	732	195	0.1537
Al-7	19.87	732	195	0.1096
Al-8	20.13	732	195	0.1528

Table 3 Heating conditions and bending moment per unit length, M₀ for surfaces in Figs. 6 and 7

surface	t (mm)	heating conditions		M ₀ (MN-m/m)
		T (°C)	v (mm/min)	
pillow shape in Fig. 6	10	760	320	0.013
saddle shape in Fig. 7	20	732	195	0.150

진 곡면과 추정된 곡면의 유사성을 식 (2)로 정의된 것에 따라 계산하면, 추정된 곡면의 유사성 δ 는 0.897이었다. Fig. 7에 보인 심형곡면에 대해서 가열선 소들을 안형곡면의 경우와 같이 Fig. 4로 정의했을 때의 ALAS가 추정된 곡면을 Fig. 9에 보여주었다. Fig. 9에서 원래의 판에 그린 굵은 실선은 판의 윗면에서 가열한 선이고 가는 점선은 판의 밑면에 가열한 것을

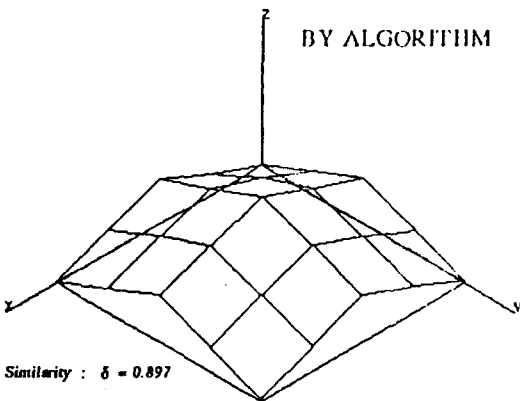


Fig. 8 Estimated surfaces by ALAS for pillow shape surface

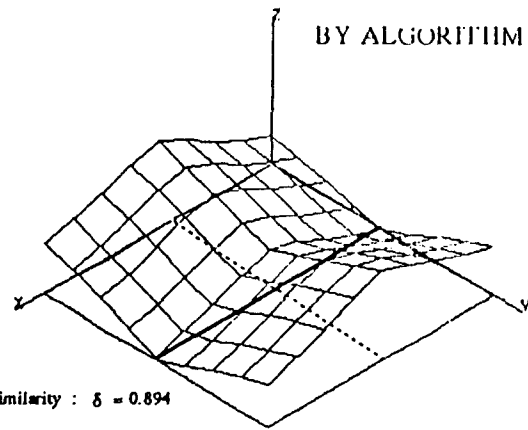
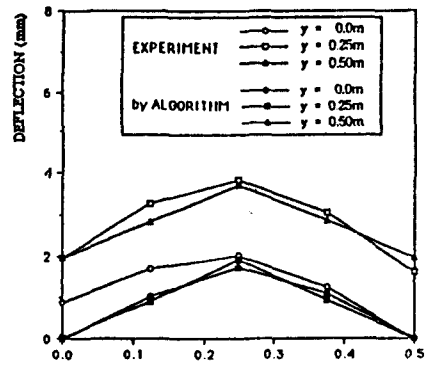
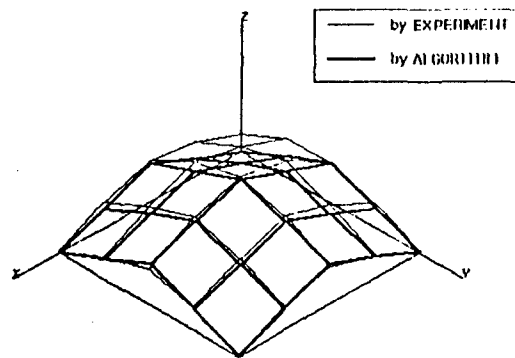
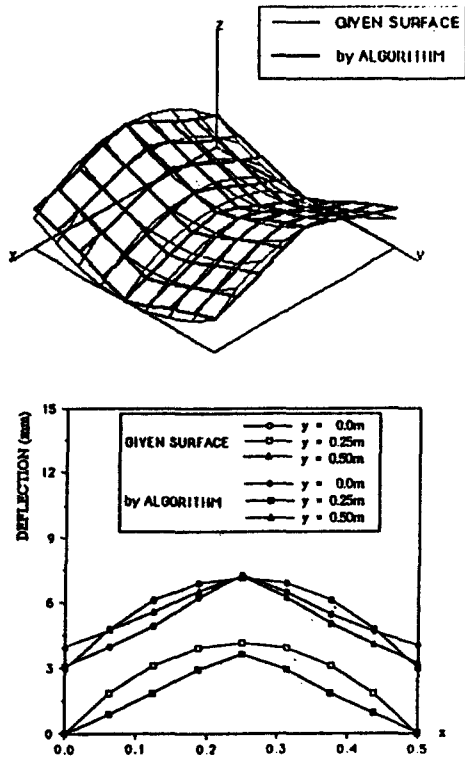


Fig. 9 Estimated surfaces by ALAS for saddle shape surface



(a) pillow shape

Fig. 10 Comparison between given and estimated surface



(b) saddle shape

Fig. 10 Comparison between given and estimated surface

나타낸다. 이 경우 유사성 δ 는 0.894이었다. 주어진 두 곡면과 ALAS로 추정된 곡면과의 비교를 위해 전체적인 모양과 $y = 0.0, 0.25, 0.5m$ 위치에서의 단면의 모양을 Fig. 10에 보여주었고, 보는 바와 같이 대체로 좋은 추정결과를 주고 있다.

4. 결 론

본 논문은 선상가열법을 이용한 강판의 곡가공 자동화 시스템 구축을 위한 하나의 방향을 제시한 논문이다. 여기에서 제안하는 알고리즘과 이에 의거하여 개발한 컴퓨터 프로그램 시스템을 두 가지 곡면에 대해 적용해 보았는데, 그 결과에서 볼 수 있듯이, 본 연구의 방법은 선상가열법을 이용한 곡가공 자동화 시스템 구축에 가능성있는 방향을 제시하고 있다고 말할 수

있겠다. 본 연구의 알고리즘에서는 합당한 가열경로의 결과를 얻기 위해서 상당히 많은 횟수의 구조해석이 반복되기 때문에, 이의 효율성을 개선한다면 곡가공 자동화 시스템의 두뇌에 해당되는 부분으로서 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

여기에서 제안한 알고리즘과 개발된 시스템을 좀 더 보완하고, 보다 실제적인 경우에 적용한 내용은 추후 발표할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Iwamura, Y. and Rybicky, E.F., "A transient elastic-plastic thermal stress analysis of flame forming", *Trans. ASME, J. of Engineering for Industry*, 1973, pp. 163-171.
- [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 of Mitsubishi Heavy Industry*, vol. 12, no. 3, 1975, pp. 327-335.
- [3] Moshaiov, A. and Vorus, W.A., "The mechanics of flame bending process : theory and applications", *J. of Ship Research*, vol. 31, no. 4, 1987, pp. 269-281.
- [4] Scully, K., "Laser Line Heating", *J. of Ship Research*, vol. 3, no. 4, 1987, pp. 237-246.
- [5] Tsuji, J. and Okumura, Y., "A study on line heating process for building of ship steels", *Trans. The West-Japan Society of Naval Architecture*, no. 76, 1988.
- [6] 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. of the Society of Naval Architecture of Japan*, vol. 170, 1991, pp. 577-586.
- [7] 신종계, "선상가열에 의한 평판가공 Simulator 연구", *대한조선학회 논문집*, 제 29권, 1호, 1992, pp. 191-200.
- [8] 장창두, 김병일, "선상가열에 의한 판굽힘

- 변형에 관한 연구”, 대한조선학회 춘계연구 발표회 논문집, 1992, pp. 188-194.
- [9] Masubichi, K., Imakita, A., Miyachi, H. and Miyake, M., “Development of an intelligent system for flame s traightening panel structures : device and algorithms to be used with robot”, Proc. Ship Production Symposium, New Orleans, U.S.A., 1987, pp. 13.1-13.12.
- [10] Nomoto, T., Ohmori, T., Sutoh, T., Enosawa, M., Aoyama, K. and Saitoh, M., “Development of simulator for plate bending by line heating”, *J. of the Society of Naval Architecture of Japan*, vol. 168, 1990, pp. 527-535.
- [11] Nomoto, T., Takechi, S., Shouki, K., Aoyama, K., Enosawa, M. and Saitoh, M., “Development of simulator for plate bending by line heating considering in plane shrinkage”, *J. of the Society of Naval Architecture of Japan*, vol. 170, 1991, pp. 599-607.
- [12] Lee, J.S., “Reliability analysis of continuous structural systems”, Ph. D. Thesis, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Univ. of Glasgow, 1989.
- [13] 임상전, 광병만, 이주성 : 유한요소법입문, 동명사, 1985.
- [14] 이주성, 오석진 “구조해석과 설계과정의 통합 시스템에 관하여”, 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 1993, pp. 120-127.
- [15] Rivara, M.C., “A grid generator based on 4-triangles conforming mesh-refinement algorithms”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, 1987, pp. 1343-1354.
- [16] 김규호, 김영복, 진준식, 황준석, “강관의 열 변형에 대한 실험적 연구(Ⅰ)”, 울산대학교 조선 및 해양공학과 졸업논문, 1992.