

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 35 卷 第 2 號 1998年 5月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 35, No. 2, May 1998

## 선상가열법에 의한 강판 가공의 가열선 결정 알고리즘

장창두\*, 문성춘\*\*

### A New Algorithm to Determine Heating Lines for Plate Forming by Line Heating Method

by

Chang Doo Jang\* and Sung Choon Moon\*\*

#### 요 약

선박 생산 현장에서는 선체의 곡가공을 위해 선상가열법이 널리 사용되고 있다. 최근 선박 생산 성 향상을 위하여 선상가열법에 의한 강판 곡가공 자동화 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 그 연구들은 주로 각각의 가정된 역학 모델을 도입하여 가열에 의한 판의 변형 거동을 해석하는 데에 집중되고 있고, 실제 곡면 가공에 이용될만한 실용성있는 가열선 결정 방법을 제시하는 것은 드물다.

본 논문에서는 선상가열 공정을 시뮬레이션하기 위해 새로운 가열선 결정 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘의 특징은 가공곡면과 목적곡면의 차이를 나타내는 변위차곡면의 곡률을 계산하는 것이다. 몇 가지의 전형적인 곡면 형상에 대해 점검한 결과, 실용성과 적용 가능성을 확인하였다.

#### Abstract

The line heating method is a popular technique used to form ship hull in shipyards. In order to promote shipbuilding productivity, some researchers have made progress in their studies on automatic fabrication system for plate forming. These researches have, however, focused on heat-induced plate deformation with particular mechanical modelings, and do not yet propose the heating paths applicable to actual plate forming process.

In this paper, a new algorithm to determine heating lines is developed to simulate the line heating process. The important feature of this algorithm is that it calculates principal curvatures of deflection difference surface which represents difference between target surface and surface in fabrication. Several trials to typical surface types show its usefulness and good applicability to practical use.

---

접수일자 : 1997년 12월 29일, 재접수일자 : 1998년 4월 21일

\* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

\*\* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 대학원

1. 서론

선상가열법은 선체의 외판 곡면 가공, 열변형 및 용접 변형의 제거 등에 널리 사용되고 있다. 하지만 구체적인 공정은 숙련된 기능공의 작업 경험에 전적으로 의존하고 있으며 기술 자료로 체계화되어 있지 않다. 이러한 생산공정을 자동화하는 작업은, 최근 인건비 상승에 의한 국제 경쟁력의 약화 및 기능 인력의 고령화와 부족에 비추어볼 때 대단히 의미있는 것으로 여겨진다.

선상가열법에 의한 곡면 가공 공정의 자동화를 위해서는 선상가열 과정의 역학적 시뮬레이션이 선행되어야 하고, 이를 토대로 목적곡면을 형성하기 위한 가열선의 위치, 가열 속도, 냉각 방법, 가열 온도, 가스압 등의 가열 조건을 산출하는 방법이 연구되어야 한다. 이러한 기초 기술을 실제 외판 가공에 적용하기 위해서는 유한요소해석, 유한요소 자동분할과 가열선 결정 등의 요소 기술이 구현되어야 한다. 이러한 연구가 통합적, 유기적으로 컴퓨터에 구현될 때, 선상가열 공정의 자동화가 이루어지는 것이다. Fig. 1-1에서는 본 연구가 목표로 하고 있는 가열선의 결정, 가열로 인한 변형 예측, 자동 가열기 등이 서로 간의 원활한 데이터의 교환으로 상호 통합적, 유기적으로 작용되어야 함을 도시하고 있다.

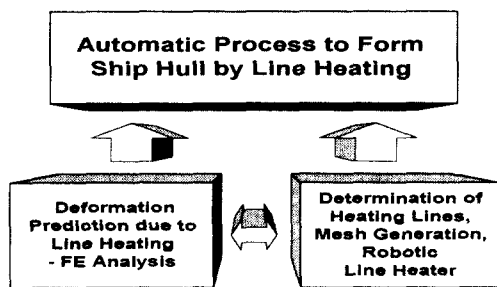


Fig. 1-1 Basic researches of Automatic Hull forming process

이제까지의 연구들은 주로 선상가열로 유발되는 가공판의 변형을 예측하는 데 집중되었다. 즉, 선상가열 열탄소성 해석을 위한 역학적 모델을 가정

하여 토치가 경유하는 가열 경로에 따른 강판의 거동을 살펴보는 것이었다([1],[2],[3],[4],[5]). 이 중에서 가열선 경로 도출을 위한 연구는 비교적 드문데, Ueda[3] 등, 이[5] 등, 유[6]의 연구 등에서 찾아 볼 수 있다. Ueda[3] 등은 고유변형도를 집중 분포시킬 판 위의 위치, 즉 가열선의 경로를 곡면의 3차원 유한요소해석 결과를 보아 변형도의 크기가 주위보다 큰 몇 요소를 택함으로써 선정하고 있고, 이[5] 등은 구조물의 안정성 해석에 이용되는 목적곡면의 파괴 경로 계산을 통해 산출된 파괴 경로 계산 알고리즘을 선상가열 위치 선정에 적용하고 있다. 유[6]는 가공에 필요한 고유변형도를 얻기 위한 Ueda[3] 등의 유한요소해석을 곡면 전개와 사상법으로 대체하여 목적곡면을 얻기 위한 고유변형도의 분포를 구하고 있다.

본 연구는, 가공 대상 곡면에서 목적곡면으로 수렴하고 실제로 적용 가능한, 새로운 가열선 결정 알고리즘을 개발하였다.

2. 가열 위치 선정의 기본 가정

2.1. 곡면 형상 판정을 위한 기본 특성치

임의의 곡면은 한 형상으로 규정되지 않고, 다만 곡면 상의 한 점에서 그 형상이 결정된다. 즉 그 곡면의 국부적인 형상만을 판정할 수 있다. 만약 곡면의 전 영역(total domain)에서 하나의 형상을 가진다면, 그 곡면은 특징적인 형상을 가진다.

곡면의 형상은 그 곡면 상의 좌표 - 매개변수 - 에 대한 미분치들로 판정된다. 본 가열선 결정 연구에서는, 그러한 미분치들을 이용하여 주곡률(principal curvature), 주곡률의 방향(principal direction), 곡률선(line of curvature), 주곡률의 극점의 궤적(locus of extremum principal curvature) 등을 계산하여 곡면의 형상 판정을 한 결과를 가열선의 결정에 이용하고 있다. 이 절에서는 본 연구에 사용되고 있는 곡면의 기본 이론식과 특성치를 소개한다. 자세한 증명은 생략하였다.

곡면은 삼차원 공간 상에 존재하지만, 근본적으로 이차원 평면 상에서 어떤 영역이 매개변수를

통해 삼차원으로 사상된 형태를 가진다. 따라서, 곡면 상의 어떤 공간 벡터  $\mathbf{S}$ 는 다음과 같이 변수  $u, v$ 를 매개로 하는 함수 꼴(parametric form)로 표현된다.

$$\mathbf{S} = \{x(u, v), y(u, v), z(u, v)\} \quad (2.1)$$

곡면 방정식의  $u, v$  각각에 대한 미분치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_u &= \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u}, \quad \mathbf{S}_v = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \\ \mathbf{S}_{uu} &= \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial^2 u}, \quad \mathbf{S}_{vv} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial^2 v}, \\ \mathbf{S}_{uv} &= \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial u \partial v} \end{aligned} \quad (2.2)$$

식 (2.2)에 나타난 일차 미분치 - 곡면의 기본 벡터로부터 주어지는 다음의 스칼라 양을 1차 기본치(fundamental magnitude of the first order)라 하고 다음과 같이 주어진다[11].

$$E = \mathbf{S}_u^2, \quad F = \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_v, \quad G = \mathbf{S}_v^2 \quad (2.3)$$

또, 2차 기본치(fundamental magnitude of the second order)는 다음과 같다.

$$L = \mathbf{n} \cdot \mathbf{S}_{uu}, \quad M = \mathbf{n} \cdot \mathbf{S}_{uv}, \quad N = \mathbf{n} \cdot \mathbf{S}_{vv} \quad (2.4)$$

여기서  $\mathbf{n}$ 은 곡면 상에서 한 점에서  $\mathbf{S}_u$ 와  $\mathbf{S}_v$ 에 수직인 단위 벡터이다. 이들 1차 기본치와 2차 기본치는 곡면 상의 한 점에서 직교단면(normal section)의 방향과 무관하게, 정해진 어떤 값들을 가진다.

곡면 상의 한 점에서의 주곡률의 최대값 및 최소값을  $x_{\max}$ 와  $x_{\min}$ 이라 하면, 가우시안 곡률(Gaussian curvature,  $K$ )과 평균 곡률(mean curvature,  $H$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} K &= x_{\max} x_{\min} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \\ H &= \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} = \frac{1}{2} \frac{EN + LG - 2MF}{EG - F^2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.2. 가열 위치 선정의 기본 가정과 기준

강판에 가해진 선상가열은 가열선을 중심으로 약한 너클(knuckle) 형상의 각변형을 유발한다. 즉, 선상가열 토치가 지나간 가열선은 가공 대상판의 가열면에서 보았을 때, 양의 집중 곡률을 발생시킨다. 강판에 적당한 곳을 여러 번 가열하여 원하는 곡면을 생성하는 것은 이러한 각변형, 즉 집중 곡률의 중첩을 이용하는 것이다. 선박 생산 현장에서는 목적곡면의 곡률의 크기를 경험에 의해 직관적으로 판단하여 가열 위치를 정한다. 마찬가지로, 본 연구에서도 직관적으로 알 수 있는 곡면의 가열 위치를 기본으로 하여 몇 가지의 전형적인 곡면에 대한 가열선의 위치를 가정한다. 곡면의 형상은 가우시안 곡률과 평균 곡률로 판정할 수 있고 이들을 이용하여 형상을 판정하면, Table 2-1과 같다[7].

Table 2-1 Relations of various typical surfaces with Gaussian and mean curvatures

Planar Surface	$K = 0, H = 0$
Peak Surface	$K > 0, H < 0$
Ridge Surface	$K = 0, H < 0$
Saddle Ridge Surface	$K < 0, H < 0$
Saddle Valley Surface	$K < 0, H > 0$
Valley Surface	$K = 0, H > 0$
Cupped Surface	$K > 0, H > 0$
Minimal Surface	$K < 0, H = 0$

이러한 가우시안 곡률과 평균 곡률로 분류한 형상을 가열 위치와 고려한다면 다음과 같다(Table 2-2). 목적곡면이 planar surface인 경우는, 평판이므로 가열할 필요가 없는 곡면이다. peak surface

Table 2-2 Various typical surfaces and assumptions of heating lines

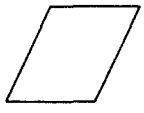

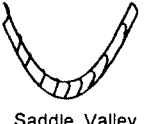









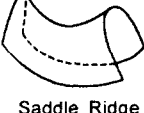

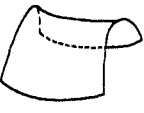

Surface type	Heating Lines	Surface type	Heating Lines
 Planar Surface		 Saddle Valley Surface	
 Peak Surface		 Valley Surface	
 Ridge Surface		 Cupped Surface	
 Saddle Ridge Surface		 Minimal Surface	
Solid line : face heating, Dotted line : back heating			

Table 2-3 Basic assumption of heating faces related to surface type

Only Face	Both Face and Back	Only Back
Cupped Surface, Valley Surface	Saddle Ridge Surface, Saddle Valley Surface, Minimal Surface	Peak Surface, Ridge Surface

는 흔히 convex type이라 불리는 것으로, 이중곡을 가지며 뒷면이 가열되어야 하는 곡면이다. 이것과 가열면의 방향이 반대인 곡면이 cupped surface로 concave type이라고도 한다. ridge surface는 단일 곡률만 가진 단순 곡면으로 직접 전개 가능한 곡면이다. 그리고 뒷면에 한 방향의

곡률을 주기 위해 뒷면만 가열한다. valley surface도 가열이 반대 면에 이루어져야 한다는 점을 제외하고는 ridge surface와 같은 성질을 가지는 곡면이다. saddle ridge surface는 전형적인 말안장 모양의 곡면으로 보통 saddle type이라 한다. 앞, 뒷면이 서로 다른 부호의 곡률을 가지므로, 양면 모두 가열할 필요가 있다. saddle valley surface와 minimal surface는 곡률의 크기만 다르고 가열면 위치의 입장에서 보면 saddle ridge surface와 같다. 지금까지의 가정을 종합하여 가열 위치를 앞면과 뒷면으로 단순 분류하면 Table 2-3와 같다. 또한 Table 2-2에서는 위의 가정에 따라 각 곡면 형상에 따라 가열선의 위치를 개념적으로 도시하였고, 이런 기본 가정이 가열 영역 결정에 그대로 사용된다.

### 3. 가열선 결정 알고리즘

#### 3.1. 알고리즘의 개요

앞서 설명한 가열 위치 선정의 가정을 기본으로 하여 가열선을 도출하는 알고리즘의 개발이 본 연구의 주된 내용이다. 초기 형상에서 목적곡면에 도달하게 하는 모든 가열선을 한 번에 구하는 것이 아니라, 목적곡면에 가장 유사하게 접근할 수 있는 가열선을 하나씩 단계적으로 구한다. 그리하여 가공곡면이 목적곡면에 만족할 만큼 수렴하면 가열선 탐색을 종료한다.

우선, 목적곡면의 형상과 가공할 초기 곡면의 형상을 입력받아 곡면 모델링(surface modeling)을 한다. 임의의 점에서의 좌표와 미분치들을 계산할 수 있으려면, 입력된 좌표값을 가진 점들을 완전히 지나는 곡면 모델링이 필요하기 때문이다. 여기서는 목적곡면과 가공곡면의 초기 형상이 비독립 형상의 위상(topology)으로 주어진다고 가정하고, 목적곡면 및 가공곡면을 모델링하기 위해서는 NURBS 곡면 (Non-Uniform Rational B-spline Surface)를 이용하였다. 그리고, 목적곡면과 초기 곡면의 형상 차이를 나타내기 위해 곡률 평가를 위한 변위차이곡면을 생성한다. 알고리즘의 목표는 가공곡면을 목적곡면에 유사하게 가공함으로써,

변위차이곡면을 평면에 가깝게 만들어 가는 것이다. 변위차이곡면을 생성한 후에는, 그 곡면 상에서 주곡률 극점들의 분포를 구하고, 그것들을 집합화하여, 가공판에 가열하면 목적곡면에 가깝게 변형을 줄 수 있는 여러 가열 후보선들을 도출하고, 이들 중에서 하나의 최종 가열선을 선택한다. 이 가열선을 중심으로 가열로 인한 변형을 구하면, 하나의 가열선과 그 가열로 인한 한 번의 곡면 형성이 이루어진다. 다시 가공곡면과 목적곡면을 비교하여 변위차이곡면을 만들고 단계적으로 가열선들을 구해나간다. 각 단계마다 얼마나 가공곡면이 목적곡면에 가까이 도달했는가를 나타내는 수렴지수(convergence index)를 검사하여, 미리 입력해 준 정도로 가공곡면이 목적곡면에 수렴하면, 그 목적곡면에 대한 선상가열 시뮬레이션을 종료한다. 이 알고리즘의 흐름을 Fig. 3-1에 도시하였다.

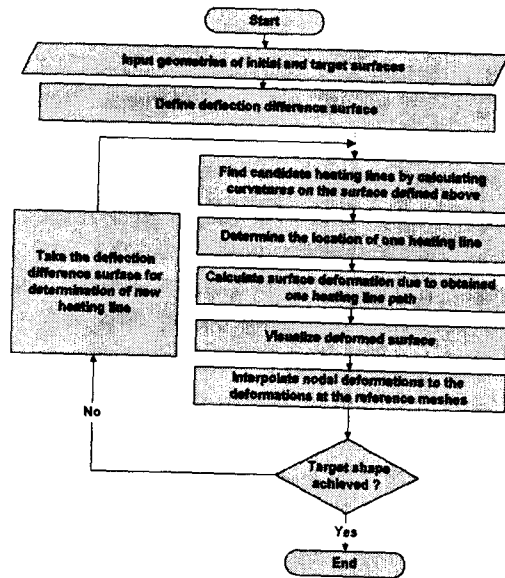


Fig. 3-1 Flow to determine heating lines

3.2. 변위차이곡면

목적곡면과 초기 곡면의 변위 차이를 계산하여, 곡률 평가를 위한 가상의 변위차이곡면을 정의한다. 먼저 곡면간의 거리계산을 위해 목적곡면을 요소 분할한다. Fig. 3-2에 도시한 바와 같이 목적

곡면의 각 절점의 x, y좌표를 기준으로 가공곡면 상의 x, y좌표가 같은 점을 가공곡면의 요소 내에서 찾는다. 그리고 그 점의 처짐량 z를 해당 요소의 4개의 절점으로부터 bilinear로 보간하여 구한다. 이 변위와 목적곡면의 변위와의 차이가 그 위치에서의 곡면 간의 거리가 된다. 이것을 z좌표로 취하고 목적곡면과 가공곡면의 x, y좌표를 기본으로 x, y좌표를 취하여 변위차이곡면을 정의한다. 곡률 계산은 목적곡면을 대상으로 하지 않고, 이 곡면을 대상으로 수행되며 이것이 평면이 될 때, 목적곡면과 가공곡면은 그 형상이 완전히 일치한다.

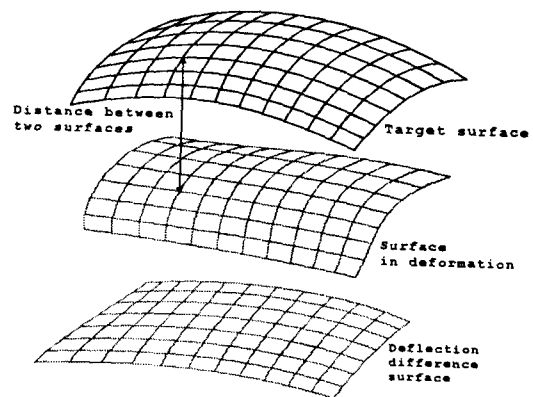


Fig.3-2. Deflection difference surface

3.3. 곡률선 계산과 가열 영역 구분

곡면 상에서 주곡률과 주곡률 방향이 정해지면, 그 주곡률 방향에 접하여 따라 가는 선이 존재하는데, 이것을 곡률선(line of curvature)이라 한다. 한 점에서는 umbilical point나 단순곡의 경우를 제외하고는, 두 방향의 주곡률 방향이 있으므로, 곡률선은 곡면 상의 어떤 점 위에서 서로 직교하는 한 쌍의 선들로 나타난다. 곡률선은 다음의 미분방정식을 만족한다.

$$(FN - MG)\gamma^2 + (EN - LG)\gamma + EM - LF = 0 \tag{3.1}$$

여기서, E, F, G, L, M 과 N은 앞에서 정의한 기본치들이고,  $\gamma$ 는 주곡률의 방향을 나타내는 방향수(direction number),  $\gamma = dv/du$ 이다.

임의의 곡면에 대해서 이 미분방정식을 해석적으로 풀지 못하므로, 곡률선을 근사적으로 구할 수밖에 없다. 곡면 상의 여러 점을 출발점으로 취하여 일정한 간격(step size)을 가정하고 위의 미분방정식을 만족하는 점들을 연속적으로 구해낸다. 5회의 가열선이 직접 가해진 실험 결과 데이터를 입력받아 만들어진 곡면에 대해, 이와 같이 구한 근사적 곡률선을 Fig. 3-3에 예시하였다.

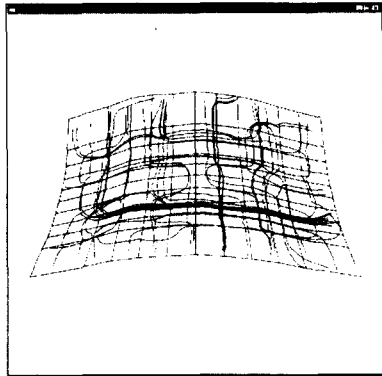


Fig. 3-3 Lines of curvature

이 곡률선을 가열선 결정에 이용하기 위해 모든 곡률선을 앞면 가열 영역과 뒷면 가열 영역으로 나누어 구한다. 만약 앞면 가열 영역의 계산 과정 중이면, 출발점은 cupped, valley, saddle type 중 하나이어야 하고, 추적점이 앞면 가열 영역(cupped, valley, saddle type)일 때까지만 추적한다. 반대로, 뒷면 가열 영역의 경우 ridge, peak, saddle type의 영역만 곡률선을 계산한다. 이 과정을 통해 자동적으로 가열 영역의 구분이 이루어지는 것이다.

### 3.4 주곡률의 극점의 궤적

곡률선을 따라서, 주곡률의 크기는 변화하고 그것이 극치(extremum)를 가지는 한 점이 존재한다. 여기서, 모든 곡률선에 대해 그러한 주곡률의 극치들은 존재하고, 그것들의 궤적을 생각할 수 있다. 이것을 주곡률의 극점의 궤적(loci of extreme principal curvature)이라 한다[9].

주곡률의 극점의 궤적은 곡률 극치 조건

(curvature extremum condition)과 곡률선 조건 - 식 (3-1)을 동시에 만족하는 점들의 집합이다. 곡률 극치 조건은 다음과 같다.

$$dx = x_u du + x_v dv = 0 \quad (3-2)$$

이 식과 식 (3-1)을 연립하면 다음의 미분방정식을 얻는다.

$$(EM - LF)x_v^2 + (GL - EN)x_u x_v + (NF - MG)x_u^2 = 0 \quad (3-3)$$

여기서,

$x_u, x_v$  ; derivatives of normal curvature  
with respect to  $u, v$

곡률선을 해석적으로 구하기가 힘들듯이 이 미분방정식 (3-3)을 만족하는 점들을 구하는 것도 대단히 복잡하다. 그러므로 앞서 수치적으로 계산한 곡률선들의 주곡률의 극치를 가지는 점들을 연결(fitting)하여 주곡률의 극점의 궤적을 구한다. Fig. 3-4는 Fig. 3-3에 보인 곡면 상에서 주곡률의 극점의 분포의 예를 도시한다. 회색 점은 양의 값을 가지는 곡률의 극점들이고, 검은 점은 음의 값을 가지는 곡률의 극점들이다. 곡면의 형상이 saddle type임을 감안하여 곡률 극점의 분포를 보면 가열을 하여 곡이 진 부근에 몰려 있음을 확인할 수 있다.

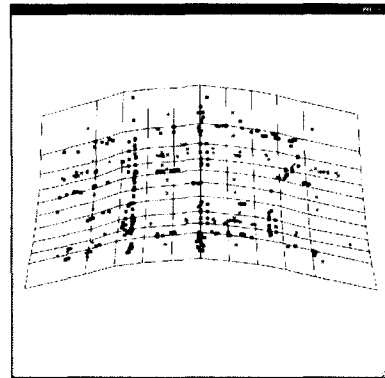


Fig. 3-4 Points of extreme principal curvature

이 궤적은 곡면에서 가장 곡이 심하게 나타나는 점들을 이은 선이라 볼 수 있다. 따라서 가공관

상에서 가장 우선적으로 가열하여 곡률을 생성시켜야 할 부분이 된다. 이 주곡률의 극점의 궤적을 가열해야 할 후보 영역으로 삼는다. 가열선은 곡면 상에 존재하는 축지선이므로, 이 궤적을 한 점씩 이은 곡선은 그대로 가열 정보로 쓰일 수 없다. 따라서 이 극치들을 곡면 상의 직선으로 집합화(grouping)하는 방법이 필요하다. 이렇게 집합화를 통해 생성된 각각의 집합을 본 논문에서는 가열 후보선(candidate heating line)이라 일컫기로 한다. 한 곡면에서 가열 후보선은 여러 개가 도출될 수 있다. 이 중에서 하나의 가열선을 선택하는 것이다.

3.5. 가열 후보선과 가열선의 결정

먼저, 앞서 구분된 각 가열 영역 - 앞면 혹은 뒷면에서 주곡률의 극점들을 주곡률 방향과 서로 간의 거리를 기준으로 분류, 집합화하고, 각각의 집합을 직선 회귀(linear regression)한다. 이렇게 직선 회귀한 선들 중 선의 길이, 주곡률의 극점의 곡률값들의 평균치, 집합 내의 주곡률의 극점의 개수를 비교한다. 선의 길이가 길고, 곡률의 평균치가 크며, 집합 내의 주곡률의 극점의 수가 많은 집합을 다른 것들보다 선택 기준에 우월한 것으로 평가한다. 이렇게 일차적으로 가열 후보선들을 추려낸다. 이들 중, 실제 목적곡면에 가장 근사하게 변형을 줄 수 있는 하나의 최종 가열선을 선택한다. 이러한 계산 과정을 통한 출력 정보는 가공곡면상에서 가열선의 시점과 종점이다. 주곡률의 극점들을 집합화하는 예는 Fig. 3-5에 보여진다.

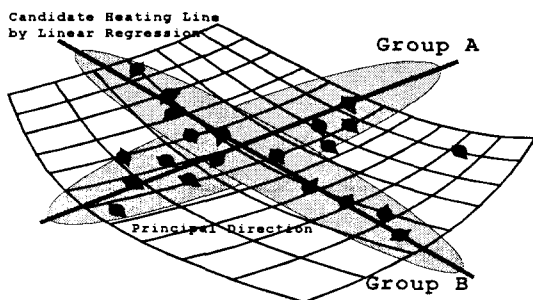


Fig. 3-5 Grouping of the points of extreme principal curvature

곡면은 오목한 형상(cupped surface)이고, 그림에서 화살표는 주곡률의 방향이다. 가열선 방향은 주곡률 방향과 서로 직각이란 관계를 가지고 있으므로 주곡률 방향을 토대로 가열선의 방향을 계산한다. 집합화하여 직선 회귀한 가열 후보선도 함께 도시하였다.

3.6. 목적곡면으로의 수렴 판정

계산한 가열선으로 각 가열이 행해질 때마다 가공곡면은 목적곡면으로 단계별로 수렴해 간다. 이때 얼마나 목적곡면에 수렴했는지를 판정하는 지수가 필요하다. 앞서 정의한 변위차이곡면을 정의할 때 쓰이는 각 절점에서의 z변위를 기본으로 하여 목적곡면으로의 수렴 여부를 판정하기 위한 지수  $i_D$ 는 다음과 같다. 이 지수가 영(zero)에 가까울수록, 목적곡면과 가공곡면은 유사한 형상을 가진다.

$$i_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - |Z_i / Z_{max}|) \quad (3-4)$$

여기서,

$N$  = number of all the nodes of deflection difference surface

$Z_i$  =  $z$  on the node of the deflection difference surface

$Z_{max}$  = maximum value of  $Z_i$

4. 가열선 결정 시뮬레이션의 예

이 장에서는, 본 방법의 타당성과 실용성을 검증하기 위해 앞서 설명한 모든 과정을 종합하여 가열선 결정의 시뮬레이션한 예를 보여 준다. 오목 형상과 안장 형상 및 뒤틀린 형상을 수학 함수로 구현한 목적곡면을 입력자료로 한다. 가열선을 중심으로 변위를 중첩함으로써 변형을 구하였다. 가열이 진척되면 적은 열량이 판에 가해진다고 가정하여 목적형상에 가까워짐에 따라 차츰 작아지는 처짐량을 가한다. 또, 초기 형상이 평판이고, 가열선의 시점과 종점은 항상 판의 가장자리에 가까운 곳에 위치하는 것으로 가정하였다. 판의 크기는  $700 \times 500 \text{mm}^2$ 이고 각각의 목적곡면의 처짐량

은 다음과 같다.

(단위는 mm,  $(0 \leq x \leq 700, 0 \leq y \leq 500)$ )

concave type

$$z = 3[(x/700 - y/500)^2 + (x/700 + y/500 - 1)^2]$$

saddle type

$$z = 0.0001[(x - 350)^2 - (y - 250)^2]$$

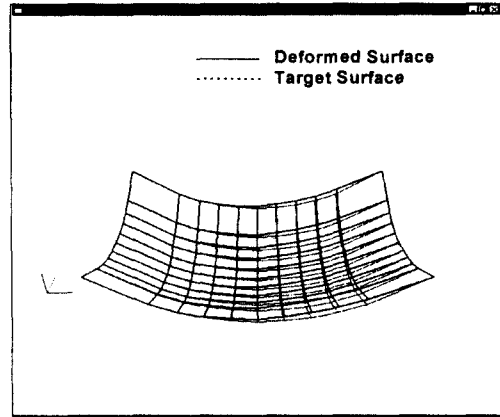
twisted type

$$z = 0.0005[(x - 350) \times (y - 250)]$$

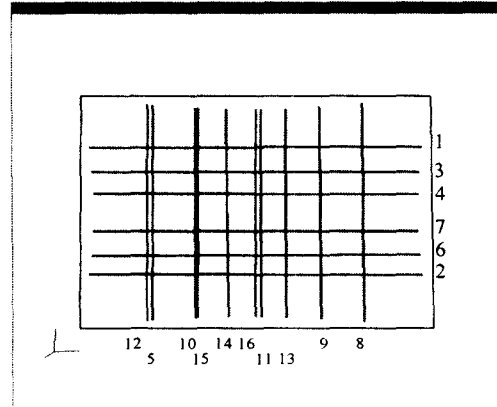
Fig. 3-1의 알고리즘대로 구현한 프로그램을 통해 얻어진 가열선과 가열순서는 Fig. 4-1, 4-2, 4-3에 나타나 있다. 각각은 목적곡면과 마지막으로 얻어진 가공곡면을 한 화면에 나타낸 그림(a)과 평판에 가해진 가열선의 위치와 가열순서(b)를 보여 준다. (a)에서 점선은 목적곡면이고 실선은 최종의 생성곡면이며, (b)에서는 실선은 앞면 가열이고 점선은 뒷면 가열을 나타낸다. z방향으로 20배 확대하여 도시하였다. 또 수렴 지수가 가열이 진행됨에 따라 어떻게 수렴하는지도 보여주고 있다(c). 이 예제를 계산하면서 오목형의 경우 가열선을 주위로 0.8 mm의 처짐량을 주었고, 안장형의 경우 1.0mm, 뒤틀린 형의 경우 1.0mm~0.4mm로 주었다.

### 5. 결론

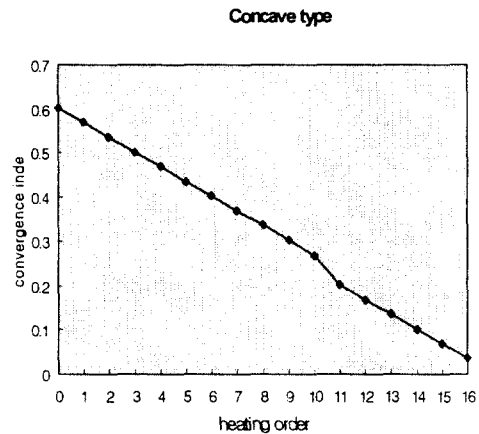
본 연구에서는 선상가열법을 이용한 곡면의 생산 자동화를 위해 가열선 결정 알고리즘을 개발하였다. 본 알고리즘의 효용성을 점검하기 위해 여러 가지 전형적인 형상을 갖는 목적곡면에 대해 시뮬레이션한 결과, 목적곡면에 수렴하는 가열선을 선정해주며 실제의 작업내용 및 다른 논문에서 발견되는 가열선의 경로와 유사함을 확인하였다 ([3],[5],[12]). 실제 선각 가공에 적용하기 위하여 변형을 구하기 위한 해석법과 결합하고, 실험을 통해 검증되어야 정확한 가열 정보를 획득할 수 있다. 통합적인 시스템이 구축되면 선상가열법에 의한 곡가공의 생산 자동화 및 곡가공 공정의 표준화에 기여할 것으로 기대된다.



(a) Target and deformed surfaces (concave)

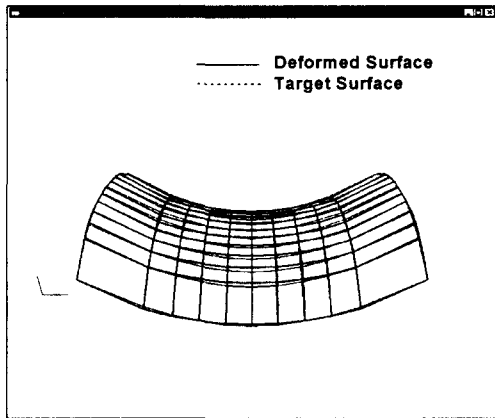


(b) Obtained heating lines for concave type

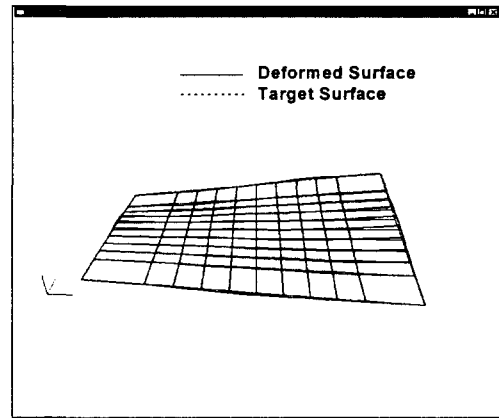


(c) Convergence index for concave type  
Fig.4-1 Test for concave type

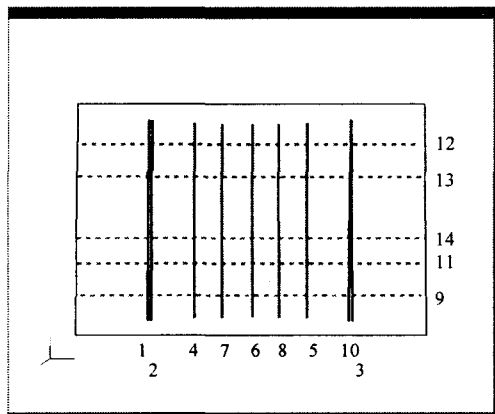




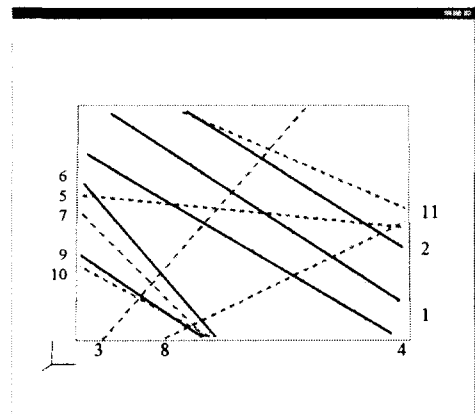
(a) Target and deformed surfaces (saddle)



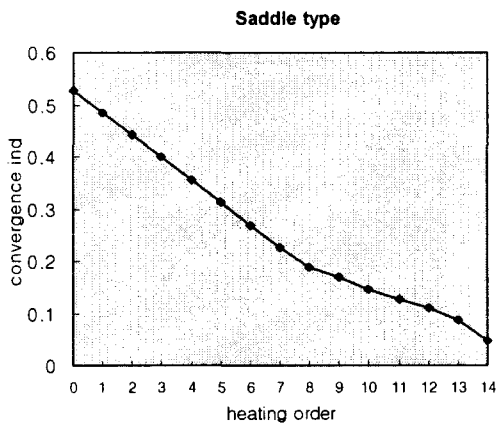
(a) Target and deformed surface (twisted)



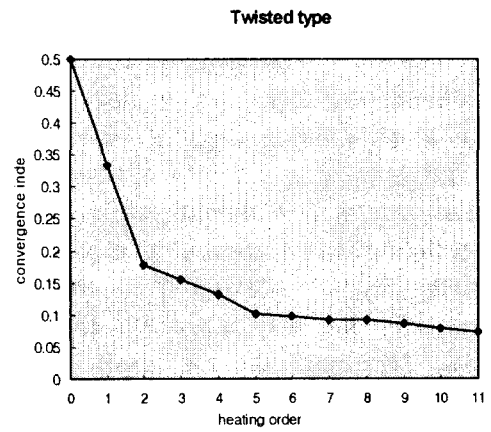
(b) Obtained heating lines for saddle type



(b) Obtained heating lines for twisted type



(c) Convergence index for saddle type  
Fig.4-2 Test for saddle type



(c) Convergence index for twisted type  
Fig.4-3 Test for twisted type

## 후 기

본 연구는 대우중공업이 기증한 서울대학교 발전기금과 해양시스템공학연구소의 지원을 받았으며 이에 깊은 감사를 드린다. 또한, 조언을 아끼지 않으신 한진중공업 서승일 박사님과 서울대학교 박사과정 고대은님께도 지면을 빌어 사의를 표한다.

## 참 고 문 헌

- [1] Jang, C.D., Seo, S.I. and Ko, D.E. , A Study on the Simulation of Line Heating Process Using a Simplified Thermal Elastoplastic Analysis Method, PRADS 95, pp.2.1447-2.1458, 1995
- [2] Shin, J.G., Lee, J.H. and Kim, W.D., A Numerical Simulation of a Line Heating Process for Plate Forming, PRADS 95, pp.2.1421-2.1432, 1995
- [3] Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Okumoto, Y. and Kamichika, R., Development of Computer-Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(Report2), Journal of Ship Production, Vol.10, No.4, pp.239-247, 1994
- [4] Nomoto, T., Ohmori, T., Sutoh, T., Enosawa, M., Aoyama, K. and Saitoh, M., Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 168, 1990.
- [5] 이주성, 김상일, 오석진, 선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템(II), 대한조선학회 논문집, 제 31권, 제 4호, pp. 139 - 146, 1994
- [6] 유병호, 선상가열 평판의 전개 및 가공 사상 결정과 그래픽 표현, 서울대학교 석사학위 논문, 1996
- [7] Marshall, A.D. and Martin, R.R., COMPUTER VISION, MODELS and INSPECTION, World Scientific Publishing, 1992.
- [8] Choi, B.K., Surface Modeling for CAD/CAM, Elsevier, 1991
- [9] Hosaka, M., Modeling of Curves and Surfaces in CAD/CAM, Springer-Verlag, 1992
- [10] Jang, C.D., Seo, S.I. and Ko, D.E., A Study on the Prediction of Deformations of Plates Due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis, Journal of Ship Production, Vol. 13, No. 1, pp 22-27, 1997
- [11] Lipschutz, M. M., Theory and Problems of Differential Geometry, McGraw-Hill Publishing Company, 1969
- [12] Ishiyama, M., Gu, S., Ogawa, J. and Takakura, D., Numerical Processing for Precision Plate Bending by Computer Aided Line-heating System, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 180, 1996