

선체 외판 부재의 곡 성형을 위한 가열 계획 생성 휴리스틱

(Heating-Plan Heuristics for Forming Curved Shell Plate of Ship Structure)

강병호^a, 박기역^a, 김웅^a, 류광렬^a, 이정환^b, 도영칠^b, 김대경^b, 김세환^b

^a부산대학교 정보컴퓨터공학부

부산광역시 금정구 장전동 산30

Tel: +82-51-510-{3645,2453}, Fax: +82-51-517-2431, E-mail: {bhokang, nerssa79, boguskim78, krryu}@pusan.ac.kr

^b삼성중공업 생산기술연구소

경남 거제시 신현읍 장평리 530

Tel: +82-55-630-6784, Fax: +82-55-630-8438, E-mail: {jh9336.lee, youngchil.doh, jungfrau.kim, sh3.kim}@samsung.com

요약

선체 외판 부재의 곡 성형 과정은 주로 가열(열간가공)에 의해 수행된다. 이 가열 작업은 작업자의 경험과 지식에 크게 의존하는 매우 어려운 작업이다. 본 논문에서는 선체 외판의 곡 성형을 위한 가열 계획을 자동으로 수립할 수 있는 휴리스틱을 소개한다. 현장 전문가의 지식에 기반한 이 휴리스틱은 크게 가열 선을 생성하는 부분과 외력을 주는 도구를 배치하는 부분으로 구성된다. 가열 선은 대상 부재의 현재 곡면과 설계된 목적 곡면과의 비교를 통해 생성되고, 가우스 커널 함수를 통해 스무딩(smoothing)된다. 현장에서는 열간가공 시 의도하지 않은 변형을 막으면서 작업시간을 줄이고자 외력을 이용한다. 외력의 위치와 방향은 가열 선 군집화를 통해 추출된 대표 가열 선을 기준으로 결정된다. 가상의 인공 곡면과 현장의 실제 부재를 대상으로 실험한 결과, 이 휴리스틱이 숙련된 전문가가 수립한 가열 계획과 유사한 가열 계획을 수립할 수 있음을 확인하였다.

키워드:

가우스 커널 함수; 군집화; 가열 계획; 열간가공

1. 서론

컨테이너선, 유조선, LNG선 등 대형 선박의 외판은 대부분 3차원 곡면으로 되어 있는데, 선박의 건조 시 설계에서 정한 일정 크기의 평평한 철판을 곡 성형하여 제조된다. 외판은 곡의 모양에 따라 크게 내종곡 형태(그릇형)와 외종곡 형태(안장형)로 구분되고, 그림 1과 같이 냉간가공(cold working)과 열간가공(hot working)을 거쳐 완성된다.

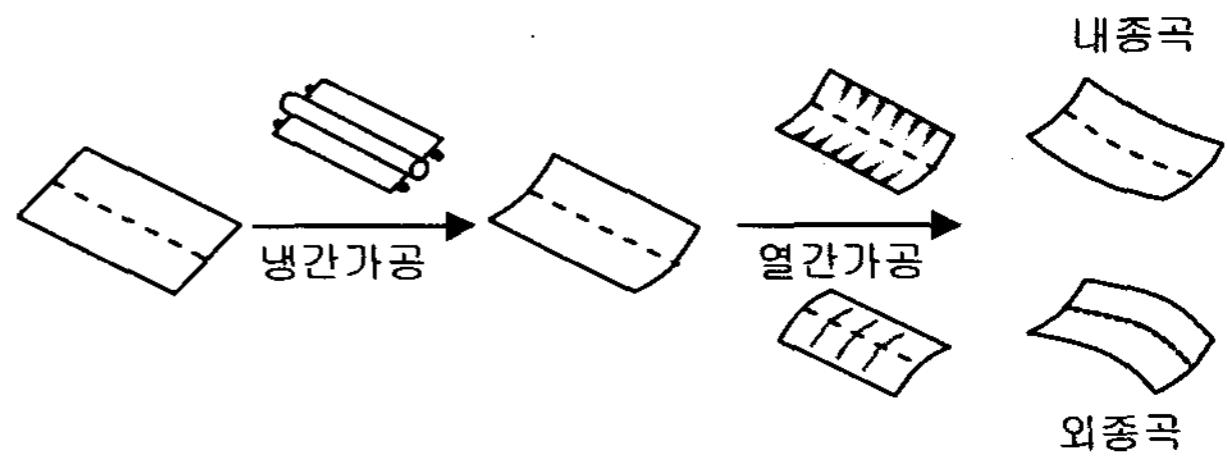


그림 1 – 선체 외판의 곡 성형 과정

냉간가공은 프레스를 이용하여 철판을 성형하는 작업이다. 현장에서는 냉간가공을 통해 주로 부재의 한 쪽 방향의 곡을 맞추는데 사용한다. 두 방향 이상의 복잡한 곡들은 열간가공을 통해 맞춰지는데, 냉간가공에 비해 많은 시간이 소요된다. 열간가공은 불확실성이 높고, 다년간 작업자의 숙련이 요구되는 어려운 작업이다. 곡 성형을 위해 열간가공을 할 때는 부재의 재질, 두께, 형상, 크기, 가열 선 주변의 형상, 주변의 온도 등에 따라 투입되어야 할 열량이 달라져서, 그 투입량을 정확히 알기 어렵고 비록 그 열량을 알 수 있어도 실제 정확히 투입하기가 쉽지 않기 때문이다.

가열 계획 수립 자동화에 대해서는 주로 유한 요소법(finite element method)에 기반한 방안들이 연구되어 왔다. 선 가열(line heating)에 의한 철판의 곡 변형을 유한 요소법으로 해석하여 예측하고, 이를 기반으로 가열 계획을 수립하는 연구가 있었다[1,2]. 이와는 다른 방향으로는 사례 기반 추론[3]에 의해 가열 계획을 수립하는 방안에 대한 연구가 있었다[4]. 본 논문에서는 기존 연구들과 조금 다른 방향에서 접근하였는데, 가열 계획을 수립하는 현장 전문가의 지식을 수집 및 정리하여 일반화 한 지식 기반 휴리스틱 알고리즘을 소개한다. 이 방안은 현장 전문가가 부재 상에서 목형을

굴려서 가열 선을 생성하는 과정을 분석하여 만든 등기율기선에 의한 가열 선 생성 알고리즘에 기반하고 있다. 대상 문제에 대한 연구가 아직은 초기 단계여서 어떤 방법론이 적합하다고 판단하기에는 어려움이 있지만, 본 논문에서 제안하는 방안은 보다 현실적인 방안이 될 수 있다고 생각한다. 실제 외판 곡 성형을 가열에 의해 완성하기 위해서는 가열 작업을 여러 작업 단계별로 분할하고, 각 단계에 맞는 가열 선을 생성하는 것이 중요하다. 그리고 곡 성형을 보다 신속히 하고 의도하지 않은 변형을 막기 위한 외력에 대한 고려가 필요하다. 본 논문에서는 기존 연구에서 고려되지 않았던 이런 문제들을 함께 해결할 수 있도록 하였다.

2. 전체 알고리즘

현장에서 가열을 통해 곡 성형하는 작업은 작업자가 대상 부재의 최종 목적 형상을 나타내는 목형과 현재 부재 형상과의 차이를 측정하여 가열 계획을 수립하고 가열 작업을 수행하는 과정을 반복하여 수행된다. 이렇게 반복 과정을 거치는 것은 작업자가 계획 단계에서 예상하지 못한 변형이 부재에서 발생될 수 있어 한 번의 가열 작업을 통해 성형 작업을 완료하는 것이 매우 어렵기 때문이다. 현장에서는 예상하지 못한 변형이 최대한 발생되지 않도록 하기 위해 곡 성형을 위해 요구되는 열량 보다 적게 투입하되, 여러 번 가열하는 방법을 선호한다. 이런 점을 반영하여 본 시스템의 전체 알고리즘의 구조는 가열 계획을 수립하고 가열 작업을 수행하는 과정을 반복하여 성형 작업을 완료할 수 있도록 설계 되었다. 본 시스템에서 가열 계획을 수립하는 전 과정은 그림 2와 같다.

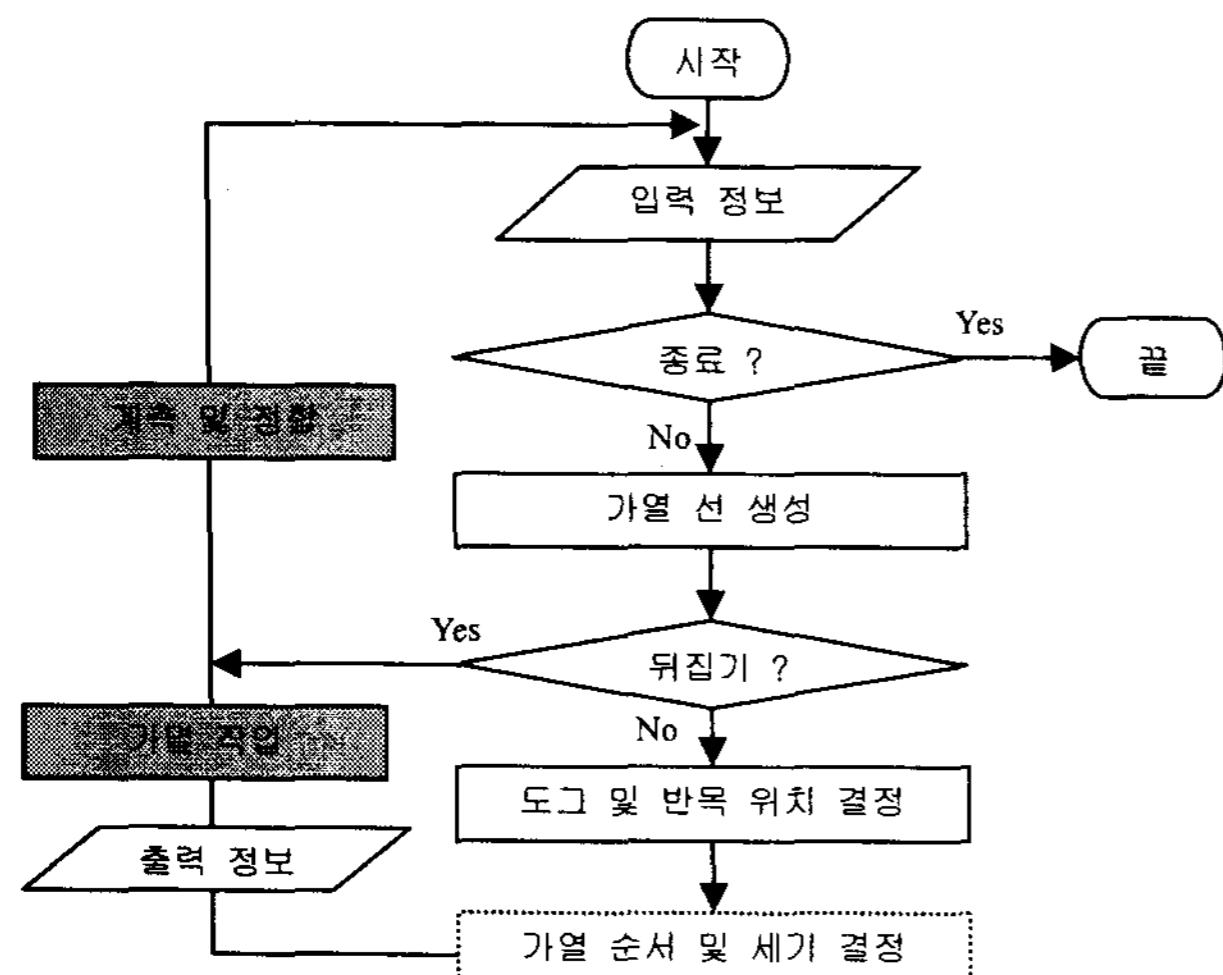


그림 2 - 가열 계획 수립 전체 흐름도

우선 대상 부재에 대한 부재명, 재질, 두께, 크기 등의 기본적인 정보와 함께, 부재의 현재 곡면과

최종 목적 곡면을 정합하여 추출된 형상 정보가 입력된다. 입력된 형상 정보를 바탕으로 현재 곡면과 최종 목적 곡면과의 차이를 측정하여 성형 작업이 완료되는지 확인한다. 종료 조건을 만족하지 못하면 가열 계획을 수립하는데, 크게 가열 선 생성, 도그 및 반목 (외력) 배치, 가열 순서 및 가열 세기를 결정하는 과정을 거친다. 가열 계획의 수립 결과로 각 가열 선을 구성하는 가열 점들의 위치, 도그 및 반목의 위치 (반목의 높이 포함), 가열 선들의 가열 순서와 가열 방향 그리고 각 가열 점에서의 가열 세기가 출력된다. 가열 순서와 세기 결정을 별도의 쟁점으로서 판단하여 본 논문에서는 이에 대한 내용은 소개하지 않았음을 밝혀둔다.

3. 입력 정보

시스템의 입력정보는 크게 부재에 대한 기본 정보와 형상 정보 두 가지로 구성된다. 부재에 대한 기본 정보에는 이름, 재질, 두께, 폭, 넓이가 있다. 형상 정보는 3차원 계측을 통해 모델링된 현재 곡면과 선체 설계 데이터로부터 획득된 최종 목적 곡면을 정합하여 추출된다. 그럼 3은 최종 목적 곡면과 현재 곡면이 정합되었을 때, 임의의 수평면을 기준으로 현재 곡면과 최종 목적 곡면에 대한 형상 정보를 추출하는 예를 보여준다.

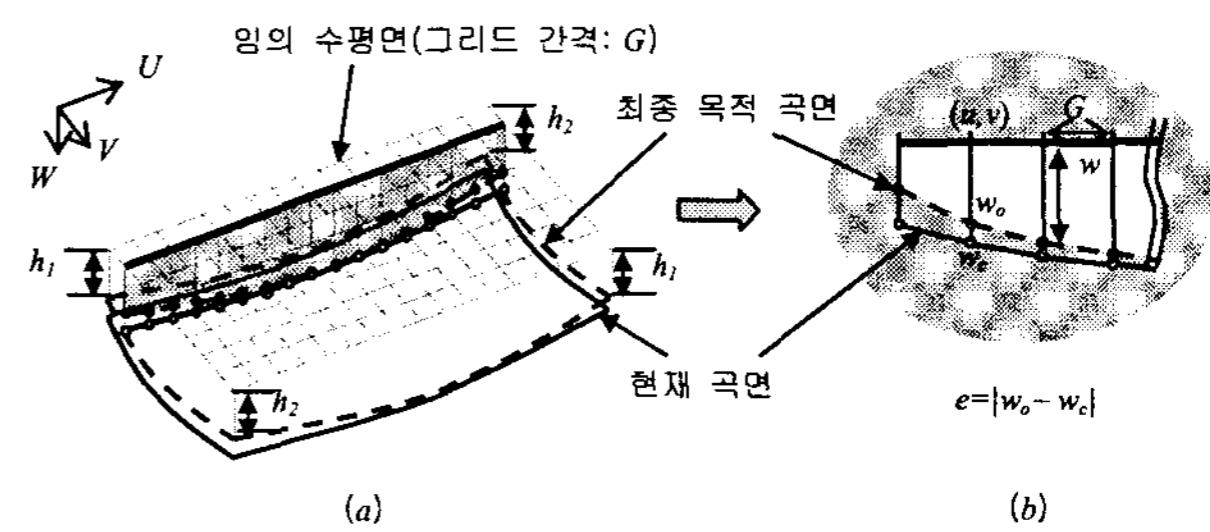


그림 3 - 부재의 형상 정보 예

우선 그림 3-(a)와 같이 최종 목적 곡면과 현재 곡면이 별도 마련된 곡면 정합 알고리즘에 의해 정합되었을 때, 부재의 대각 방향의 두 꼭지점에서 같은 높이(그림 3-(a)에서 h_1 과 h_2)에 있는 임의의 수평면을 정의한다. 이 평면을 부재의 종 방향(U)과 횡 방향(V)을 기준¹으로 일정 간격(G)으로 분할하여 획득된 점(u, v)들에 대해 그림 3-(b)와 같이 그와 대응되는 최종 목적 곡면의 점(u, v, w_o)과 현재 곡면의 점(u, v, w_c)들의 집합을 구하여 각각 부재의 최종 목적 곡면과 현재 곡면의 형상 정보로 사용한다. 최종 목적 곡면의 점과 대응되는 현재 곡면의 점을 구하는 방법으로 본 논문에서는 간단히 최종 목적 곡면의 점들에 대해서 수평면의 수선과 현재 곡면과 만나는 점을 대응점으로 하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 최종 목적 곡면과 현재

¹ 편의상 앞으로 부재의 길이 방향을 종 방향, 부재의 폭 방향을 횡 방향이라고 부른다.

곡면의 곡의 차가 큰 가열 초기 단계에서 실제 대응점과의 위치에 대한 오차가 클 수 있다. 그러나 반복적인 가열 작업을 통해 점차 부재의 형상을 최종 목적 곡면에 가깝게 성형할수록 이 오차는 점차 줄어들 것으로 기대된다. 이와 같이 추출된 형상 정보는 대응점들의 집합으로 가공되어 입력된다.

4. 종료 조건

현장에서 열간가공에 의해 성형되는 부재는 (비록 곡의 모양을 보고 크게 내종곡, 외종곡 부재로 구분할 수 있으나) 재질, 두께, 크기, 곡의 모양 등이 일정하지 않고 매우 다양하다. 그리고 가열에 의한 성형 작업이 불확실성이 높은 작업인 만큼, 예상치 못한 변형이 발생될 수 있다. 또한 작업자의 작업 방식 중에는 현재 형상과 최종 목적 형상으로부터 추출할 수 없는 중간 목적 형상을 상정한 채로 성형을 (예를 들어, 의도적으로 특정 방향의 곡을 최종 목적 형상의 해당 곡보다 더 크게 초과 가열) 한 다음 다시 최종 목적 형상으로 가공하기 위한 성형을 하는 경우도 있다. 이런 점들을 감안할 때, 시스템이 모든 부재에 대해서 완벽한 성형이 될 때까지 가열 계획을 수립하기란 어렵다고 판단된다. 본 알고리즘에서는 알고리즘에 의해 수립된 가열 계획이 개선이 없을 경우 가열 계획을 작업자가 수립할 수 있도록 종료 상황을 두 가지로 구분하였다.

대상 부재의 현재 형상이 최종 목적 형상과 일치할 때는 정상 종료된다. 최종 목적 형상을 구성하는 모든 점(u, v, w_o)들과 이에 대응되는 현재 형상의 점(u, v, w_c)들 간의 높이 차이(그림 3-(b)에서 $e=|w_o - w_c|$)의 최대값이 임계치 이하이면 현재 형상이 목적 형상과 일치했다고 판단하고 정상 종료 된다. 만약 가열 작업을 수행하는 과정을 반복하더라도 현재 형상에 대한 개선이 없을 때는 비정상 종료되는데, 현재 형상과 목적 형상을 구성하는 모든 대응점들 간의 높이 차이의 최대값이 2회 반복 수행하는 동안에도 줄어들지 않으면 비정상적인 종료로 판단한다.

5. 가열 선 생성

부재의 곡면이 비교적 단순한 일부 부재에 대해서는 냉간가공 후 초기 형상으로부터 바로 최종 목적 형상으로 성형할 수 있는 가열 선을 생성할 수 있다. 그러나 대부분의 부재들에 대해서는 이런 가열 선을 생성하기 어렵다. 비록 이런 가열 선을 생성할 수 있을지라도 여러 방향의 곡을 동시에 맞추려는 복잡한 가열 선이 되어 예기치 않는 변형이 발생할 가능성이 높게 된다. 현장에서는 이런 점을 감안하여 가열 작업을 여러 단계로 구분하고 각

단계에 적합한 가열 선을 생성하여 가열하는 방식을 사용한다. 작업의 단계는 비틀림 맞춤 작업, 종곡 맞춤 작업, 횡곡 맞춤 작업, 수정 가열 작업 순으로 구성되고, 각 단계에서 간단히 사용될 수 있는 측정 기준들은 다음 그림과 같다.

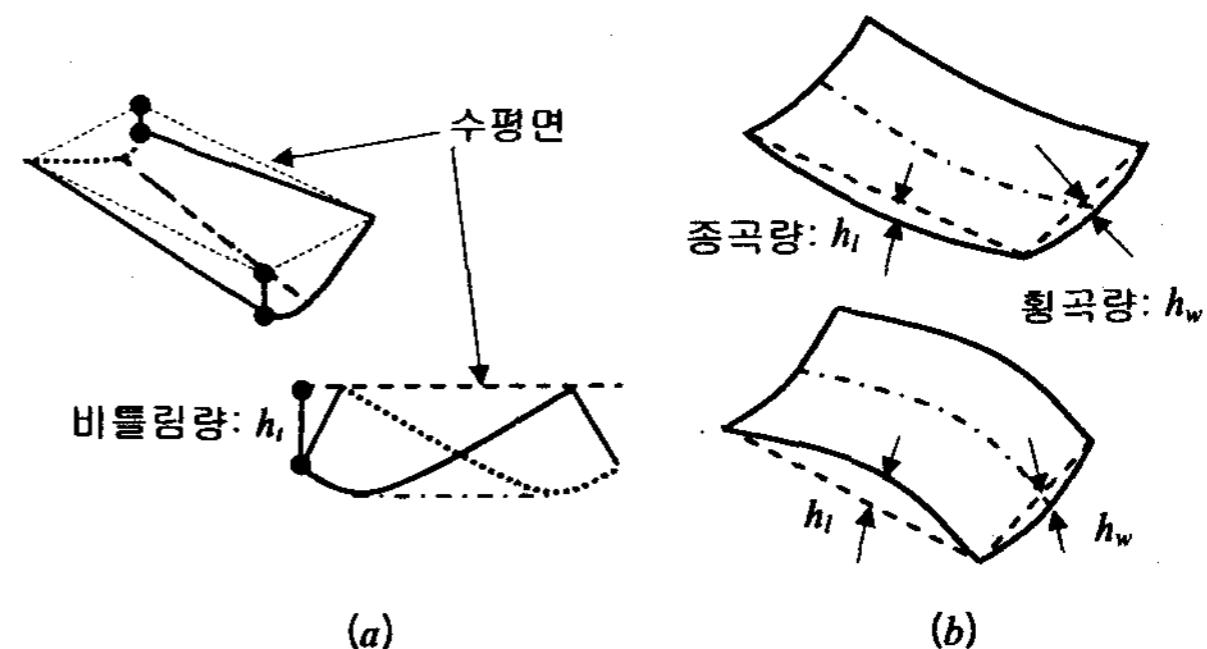


그림 4 – 비틀림량, 종곡량, 횡곡량

비틀림 맞춤 작업은 부재가 비틀어진 정도를 맞추는 작업으로 대체로 가열 선들이 부재의 대각 방향으로 생성된다. 부재가 비틀려 있다면 그림 5의 (a)와 같이 냉간가공의 기준이 되는 선(roll line)이 부재의 종 방향(또는 횡 방향)에 대해 기울어져 있다. 비틀림을 맞추는 가열 선은 이 기준선에 평행한 방향으로 생성된다. 종곡 맞춤 작업과 횡곡 맞춤 작업은 각각 종 방향과 횡 방향의 곡을 맞추는 작업이다. 이 때 가열 선은 대체로 해당 방향에 수직으로 생성된다. 수정 가열 작업은 마무리 작업으로 비틀림, 종곡 그리고 횡곡이 어떤 임계치 이하로 맞춰졌을 때 수행되는데, 임의 방향의 가열 선들이 생성될 수 있다.

본 논문에서 소개되는 알고리즘에서는 이런 측정 기준들을 사용하여 작업 단계를 파악하고, 해당 작업 단계의 중간 목적 형상을 생성한 뒤, 이를 바탕으로 가열 선들을 생성할 수 있도록 하였다. 현재 형상과 최종 목적 형상을 이용하여 본 알고리즘에서 고안된 단계별 중간 목적 형상 생성 방법을 설명하면 다음과 같다.

중간 목적 형상 결정

비틀림 맞춤 작업에서 비틀림 방향을 보면 종곡과 횡곡 두 방향을 동시에 맞추는 가열 선을 생성해야 한다. 본 알고리즘에서는 비틀림 맞춤 작업에서 횡 방향의 곡을 맞추는 것이 종 방향의 곡을 맞추는 것보다 더 중요하다고 판단하였다. 종 방향의 곡은 이후 종곡 맞춤 작업에서 맞춰지기 때문이다. 비틀림 또는 횡곡 맞춤 작업을 위한 목적 형상은 그림 5과 같이 최종 목적 형상의 횡 방향의 각 선(의 대응점들)을 대응되는 현재 형상의 횡 방향 선에 접할 때까지 평행 이동시킴으로써 생성된다. 이와 같이 하여 생성되는 중간 목적 형상은 최종 목적 형상의 횡곡은 그대로 유지하면서 종곡은 현재 형상의 모습과 거의 일치하는 (또는 최종 목적

형상과 현재 형상간의 종곡 차가 가능한 제거된) 형상이다.

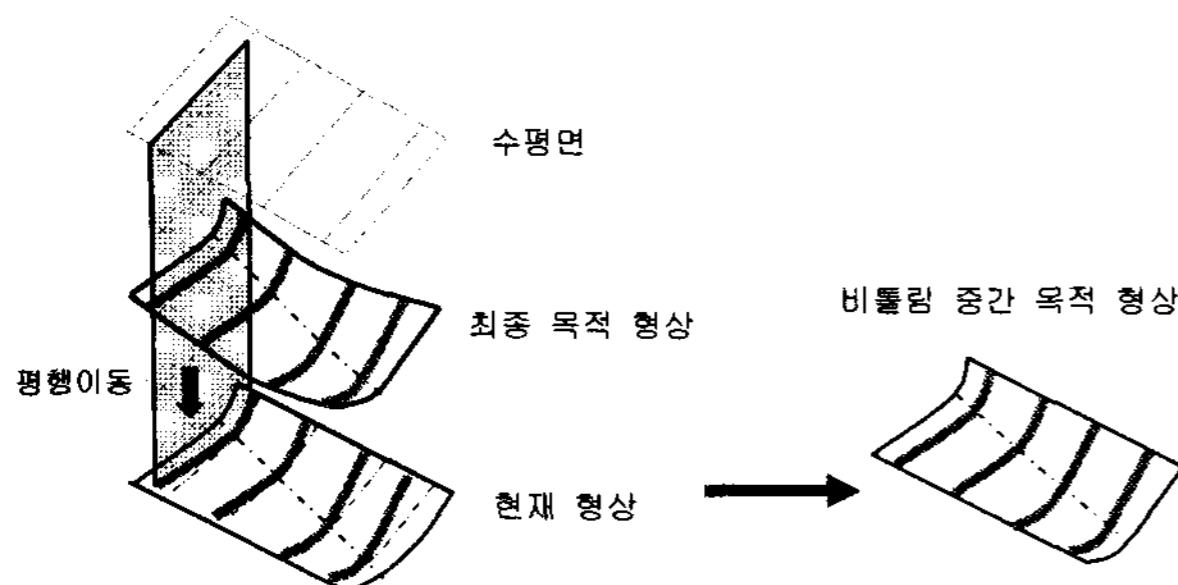


그림 5- 비틀림 (또는 횡곡) 중간 목적 형상 예

종곡 맞춤 작업은 그림 6과 같이 최종 목적 형상의 종곡 방향의 각 선(의 대응점들)을 현재 형상의 대응되는 횡곡 방향 선에 접할 때까지 평행 이동시킴으로써 생성된다. 이와 같이 생성되는 중간 목적 형상은 최종 목적 형상의 종곡은 그대로 유지하면서 횡곡은 현재 형상의 모습과 거의 일치하는 (또는 최종 목적 형상과 현재 형상간의 횡곡 차가 가능한 제거된) 형상이다.

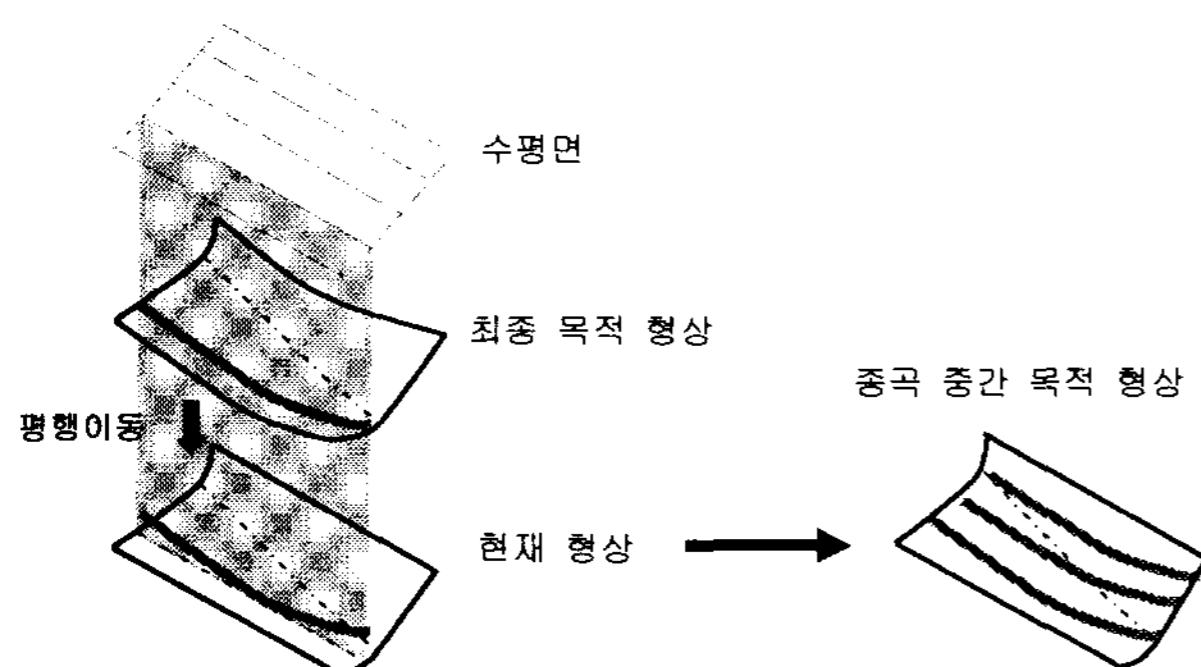


그림 6- 종곡 중간 목적 형상 예

마지막으로 수정 가열에서는 부재의 현재 형상이 최종 목적 형상과 거의 유사할 때 수행된다. 따라서 수정 가열 단계에서는 현재 곡면을 최종 목적 곡면과 직접 비교하여 종곡과 횡곡을 동시에 맞추는 가열 선들을 생성한다.

작업 단계와 이에 해당하는 (중간 또는 최종) 목적 형상이 결정된 뒤에는 목적 형상과 현재 형상을 바탕으로 가열 선이 생성되는데, 두 형상 정보로부터 등기울선을 생성하는 과정과 이 선들을 스무딩 (smoothing)하여 현실적인 가열 선을 생성하는 과정을 거친다.

등기울기선의 생성

현장 작업자들은 선체 설계 정보로부터 만들어진 목형을 부재 상에 잘 맞도록 배치하여 비틀림량, 종곡량, 횡곡량을 측정한 후 작업 단계를 결정하고, 종 방향 또는 횡 방향으로 목형을 굴려서 현재 형상을 최종 목적 형상으로 성형하기 위한 가열

선을 계획한다. 종곡 맞춤 작업을 예로 들어 설명하면, 종 방향의 목형들을 종곡 방향으로 굴려서 현재 형상에서 곡이 맞지 않는 지점들을 파악한 후 종곡을 맞출 수 있도록 이들 점들을 적절히 연결하여 가열 선을 생성한다. 본 알고리즘에서는 현업에서 사용하는 이런 방식을 보다 일반화하여 목적 형상과 현재 형상간의 각 대응점의 높이 차로 형성되는 면의 기울기를 구하여 기울기가 같은 지점을 연결한 등기울기선들을 구하는 방안을 고안하였다.

그림 7-(a)는 등기울기선을 생성하는 방안을 현재 형상과 목적 형상간의 대응점들의 높이 차로 형성되는 면이 구면인 경우와 멕시칸 모자인 경우를 대상으로 보여준다. 현재 형상과 목적 형상간의 대응점의 높이 차가 (아래로 볼록한) 구면인 경우는 표면만 가열하면 되는 대표적인 예이고, 멕시칸 모자인 경우는 표면과 이면을 가열해야 하는 경우가 섞여 있는 대표적인 예이다.

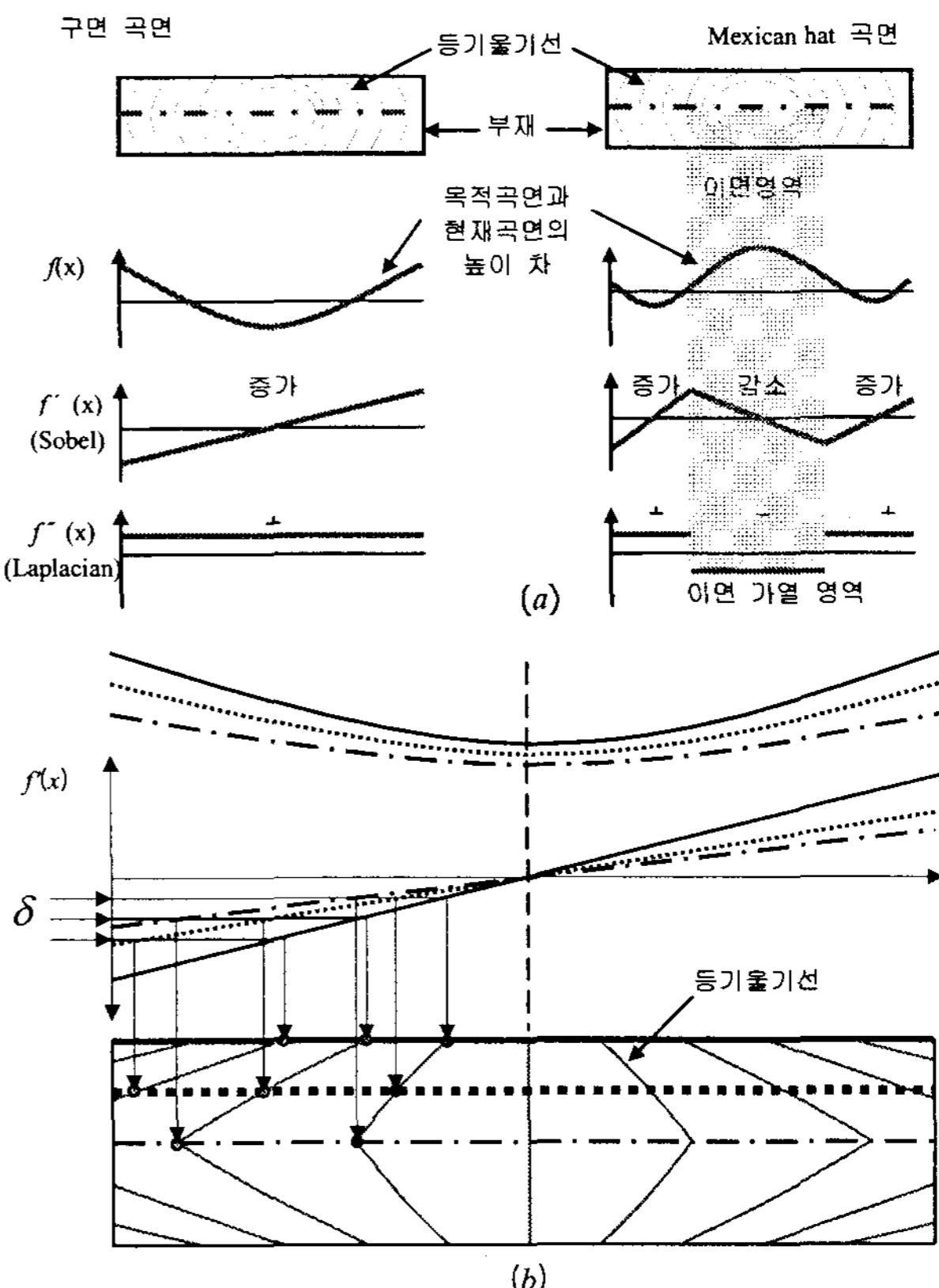


그림 7- 등기울기 선 생성 예

이해를 돋기 위해 이 두 가지 경우에 대해서 간단히 부재의 종 방향 중심을 지나는 선(그림에서 일점쇄선)의 부분만을 대상으로 하여 설명하면 다음과 같다. 현재 형상과 목적 형상간의 높이 차를 $f(x)$ 라고 하면, 즉 간단히 현재 형상이 평면이고 목적 형상이 $f(x)$ 라고 생각하면, $f(x)$ 를 일차 미분하면 대략 그림의 $f'(x)$ 와 같이 된다. 구면인 경우에는

기울기가 단조 증가하는 형태이고, 멕시칸 모자인 경우에는 단조 증가와 감소 그리고 증가로 이어지는 형태이다. $f(x)$ 그래프를 (세로축 기준) 동일한 기울기 간격(δ)으로 나눈 다음, 같은 기울기 값을 가지는 점들을 그림 7-(b)와 같이 연결하면 등기울기선들을 구할 수 있다. 그림의 예에서와 같이 현재 형상과 목적 형상간의 대응점들의 높이 차가 구면인 경우는 표면을 가열하면 되지만, 멕시칸 모자인 경우와 같이 기울기가 감소되는 영역이 존재한다. 이 부분은 뒤집어서 이면에 가열해야 하는 부분으로 이차 미분을 통해 쉽게 찾을 수 있다. 현재 형상과 목적 형상간의 대응점들의 높이 차에 대한 정보는 실제로 2차원 데이터이다. 2차원 데이터에 대한 일차 미분은 이미지 처리(machine vision)에서 경계선 파악(edge detection) 시 주로 사용되는 Sobel operator를 사용하였고, 이차 미분을 위해 Lapalican operator를 사용하였다.[5]

가열 선 smoothing

위와 같이 각 작업 단계에 적합한 목적 형상과 현재 형상으로부터 생성되는 등기울기선 자체를 바로 가열 선으로 볼 수 있으나, 실제 부재를 대상으로 등기울기선을 구해보면 현장 작업자가 생성한 가열 선과 달리 매우 변화가 심한 자유 곡선이 되는 경우가 있다. 이런 가열 선을 가열할 경우 부재가 의도대로 성형이 되지 않고, 오히려 예상하지 못한 변형이 발생될 수 있다. 따라서 본 시스템에서는 등기울기선의 형태를 현장 작업자의 가열 선과 가능한 비슷하게 만들기 위해 등기울기선을 스무딩(smoothing)한다. 스무딩은 각 등기울기선 별로 수행되는데, 대상 등기울기선을 구성하는 각 가열 점(u, v)을 UV 평면상에서 스무딩하기 위해서 다음과 같은 가우스 커널 함수(Gaussian kernel function)를 도입하였다[6].

$$f(u_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u_i-u_k}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

위 식에서는 등기울기선의 어떤 점의 종 방향 좌표 u_i 를 대상으로 이 등기울기선을 구성하는 모든 점들 (n 개)에 대해서 종 방향(U)으로 스무딩하는 식을 보여준다. 등기울기선을 구성하는 점들의 좌표를 종 방향과 횡 방향(V)으로의 스무딩은 해당 방향을 기준으로 기울기가 0인 지점이 한 개 이하가 될 때까지 반복적으로 수행된다.

삼각가열 적용 기준

현장에서 사용하는 가열 방식에는 일반적인 선 가열 외에 삼각가열이 있다[7,8]. 이 방식은 부재의 종 방향 양쪽 경계선에 밀변이 접하는 삼각형 모양의 가열 지점들을 여러 개 배치하여 부재의 가운데에 있는 꼭지점으로부터 나선형을 그리면서 밀변

방향으로 가열하는 방식이다. 삼각가열을 하면 부재의 경계선 부분에 가열을 통한 수축이 더 많이 발생된다. 현장에서는 이 점을 이용하여 부재를 그릇 모양 (내종곡)으로 성형할 때 삼각가열을 사용한다.

본 알고리즘에서는 작업 단계가 종곡 맞춤 단계인 경우, 앞 절에서 설명한 바와 같이 종곡 중간 목적 형상을 통해 등기울기선을 구한 뒤에, 삼각가열을 적용할지 판단하기 위해 부재에 내종곡이 있는지 조사한다. 만약 부재에 내종곡이 있으면 등기울기선과 부재의 종 방향 외곽 경계선이 만나는 지점들에 삼각가열 패턴들을 배치하고, 그렇지 않으면 앞 절에서 설명한 바와 같이 스무딩을 통해 가열 선을 생성한다. 다음 그림은 삼각가열 패턴이 적용될 수 있는 내종곡 판단 기준을 간단히 보여준다.

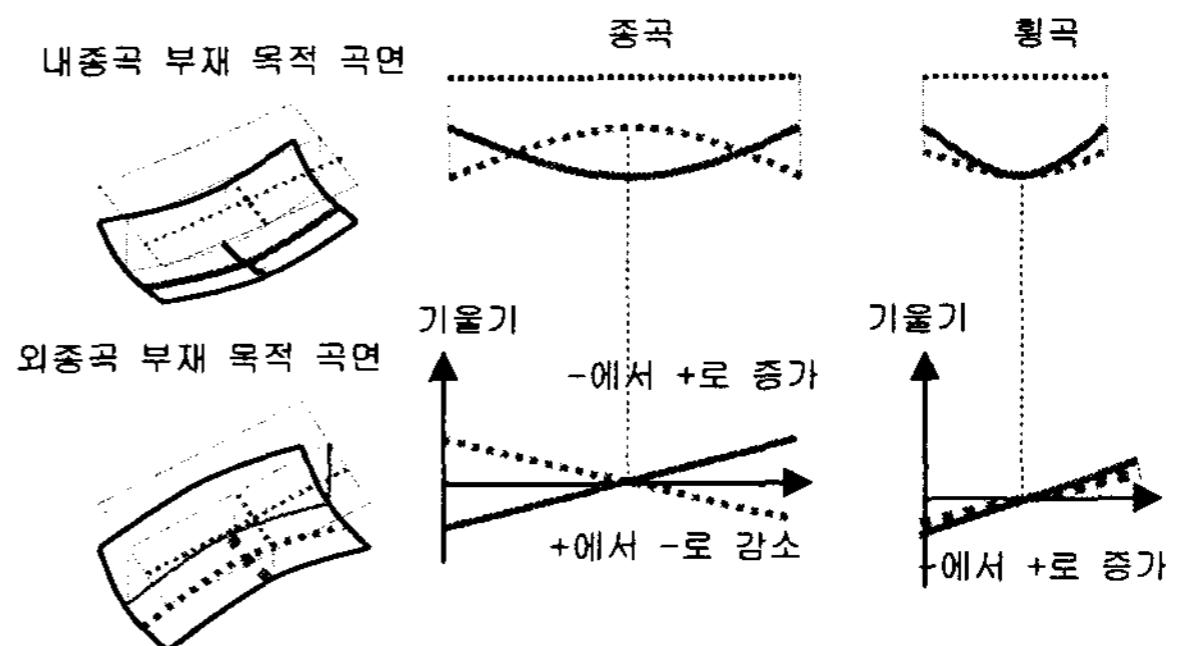


그림 8 – 내종곡 판단 기준

내종곡 부재는 그림 8과 같이 종곡과 횡곡의 휘어진 방향이 같은 부재로 기울기 증감 방향이 종 방향과 횡 방향이 같다. 외종곡 부재는 그림에서와 같이 종곡과 횡곡의 휘어진 방향이 서로 반대인 부재로 종 방향 선과 횡 방향 선의 기울기의 증감이 일치하지 않는다. 실제 부재 중에는 부재의 한쪽 부분만 내종곡이 있는 즉 삼각가열 패턴이 적용될 수 있는 부재가 있다. 따라서 삼각가열 적용 여부를 결정하기 위한 판단 기준으로는 위 그림과 같이 부재를 종 방향으로 반씩 구분하여 내종곡을 확인한다.

6. 외력의 배치

현장에서 가열 작업 시 작업자가 의도하는 변형을 촉진하거나 원치 않는 변형을 막기 위해서 외력을 추가로 사용한다. 외력으로 사용되는 도구에는 도그와 반목이 있다. 도그와 반목의 위치를 결정하는 방법은 작업별로 조금씩 차이가 있는데, 본 연구에서는 현장 작업자의 지식을 바탕으로 도그와 반목 위치를 결정하는 알고리즘을 고안하였다.

다음 그림10은 비틀림 맞춤 작업과 종곡 맞춤

작업의 도그와 반목을 배치하는 예를 보여준다.

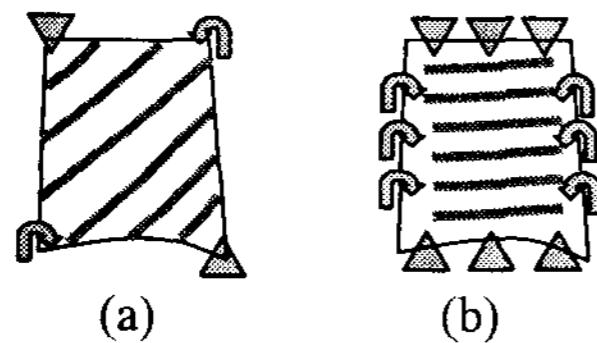


그림 10- 비틀림 맞춤 작업(a)과 종곡 맞춤 작업(b)의 외력 배치 예

비틀림 맞춤 작업이 종곡 맞춤 작업 시에는 다수의 가열선이 비슷한 방향으로 생성된다. 이 때 외력은 가열선에 의한 부재의 변형을 도울 수 있는 위치에 배치된다. 도그는 부재를 아래로 누르는 역할을 하고, 반목은 부재를 들어올리는 역할을 한다. 통상 철판에 선 가열을 하면, 가열선 부위가 내려가고 상대적으로 가열선의 직교 방향의 부분이 올라오는 변형이 발생된다. 따라서 가열선에 나란한 방향으로 도그를 배치하고, 가열선에 직교하는 방향으로 반목을 배치하여 변형을 돋는다. 위 그림과 같이 비틀림 맞춤 작업은 대체로 부재의 대각 방향으로 가열 선이 배치되는데, 가열 선 방향의 양쪽 끝 꼭지점에는 도그를, 그리고 이 방향에 수직 방향의 꼭지점에는 반목을 배치하고, 종곡 맞춤 작업은 부재의 종 방향으로의 곡을 맞추는 작업으로 부재의 종 방향 경계선의 가운데를 도그로 누르고 양 끝을 반목을 이용하여 들어 올리는 방식으로 작업한다. 종 방향 경계선의 곡이 치우치는 정도에 따라 도그의 위치가 조금씩 달라질 수 있다.

현장에서 횡곡 맞춤 작업은 보통 사전에 냉간가공으로 맞추어 둔 횡곡이 종곡 맞춤 과정에서 변형된 경우이거나 냉간가공에서 다 맞추지 못한 횡곡을 맞추기 위해 수행된다. 변형되는 횡곡량 또는 맞추어야 할 횡곡량이 크지 않기 때문에 대부분 마무리 작업인 수정가열과 함께 수행된다. 수정가열 작업에서는 종곡과 횡곡을 비롯하여 여러 방향의 곡을 한꺼번에 맞추는 가열 선들이 생성될 수 있고, 이 가열 선들에 가열 작업을 할 때 이미 맞춰진 방향의 곡은 변형되지 않아야 하기 때문에 비틀림과

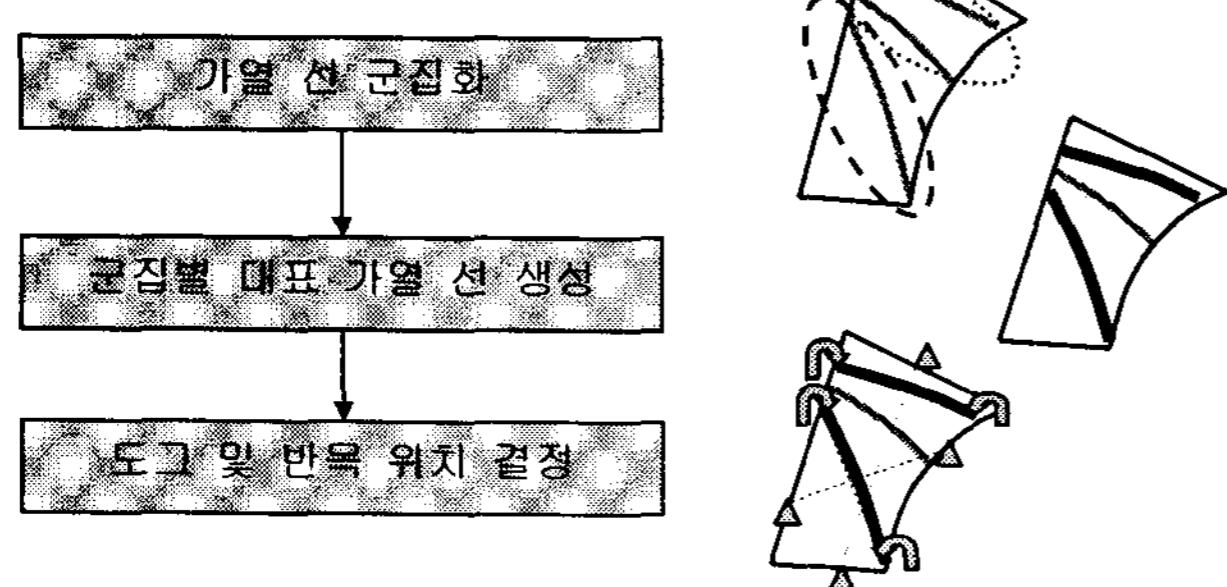


그림 11- 수정 작업 외력 배치 방법

종곡의 경우처럼 도그와 반목 위치를 간단히

결정하기가 쉽지 않다. 수정 가열 작업 시 도그 및 반목의 위치를 결정하는 알고리즘은 그림 11과 같다. 먼저 가열 선을 위치와 방향에 따라 군집화(clustering)하여 각 군집별로 대표 가열 선을 생성한다. 대표 가열 선을 기준으로 도그 및 반목의 위치를 결정하는 방법은 그림 11과 같이 대표 가열 선의 양 끝점에 도그를 설치하고, 양 끝점을 잇는 선의 수직 이등분선과 부재의 경계선이 만나는 점에 반목을 설치한다. 만약, 도그와 반목의 위치가 중첩되거나 일정 범위 내에 있으면 반목을 설치하지 않는다.

가열 선 군집화

수정 가열 단계에서는 방향, 길이, 모양(직선, 포물선 등) 등이 다른 다양한 가열 선들이 생성될 수 있다. 이 단계에서 현장 작업자는 굽히려는 방향과 가열 선 위치와 길이 등을 고려하여 대표적인 가열 선들을 기준으로 도그와 반목을 배치한다. 본 시스템에서는 생성된 가열 선들 중에서 도그와 반목 배치 시 기준이 되는 대표 가열 선을 추출하기 위해 기계학습에서 사용되는 군집화 기법을 도입하였다[9].

그림 12는 가열 선을 군집화 예를 보여준다. 그림 12과 같이 가열 선이 생성되었을 때, 부재의 어느 한 외곽 경계선(그림에서 부재의 위쪽 외곽 경계선)을 기준으로 각 가열 선까지의 거리(d_i)를 구한다(그림에서 좌측 하단). 가열 선으로부터 기준이 되는 외곽선까지의 거리는 해당 가열 선을 구성하는 가열 점들에서 외곽선까지의 평균 거리로

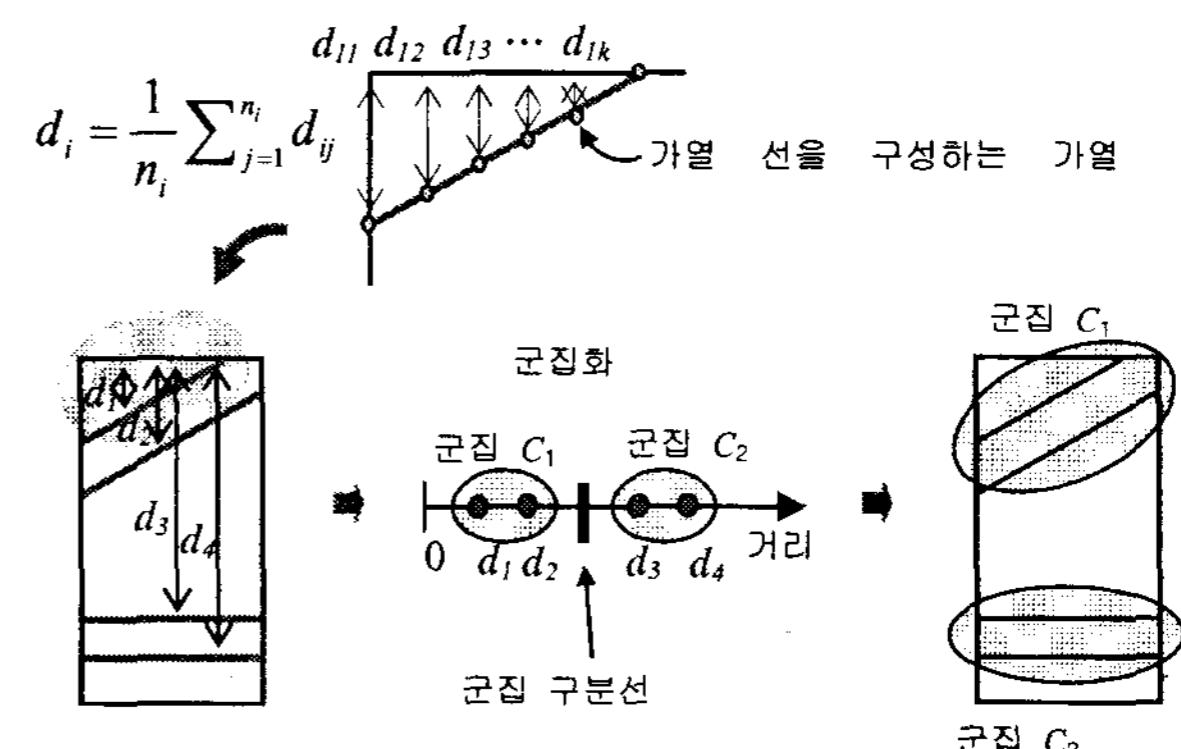


그림 12- 가열 선 군집화 예

계산된다(그림에서 상단). 각 가열 선을 기준 외곽선까지의 평균 거리로 표현하면 (그림의 중앙과 같이) 거리 축 상에서 한 점에 대응된다. 이와 같이 하였을 때 가열 선 군집화는 일차원으로 표현된 점들 사이에 군집을 구분하는 경계선을 긋는 문제로 사상(mapping)된다. 즉 가열 선을 몇 개의 군집으로 나누어야 할 지와 어떻게 나누어야 할지를 결정하는 군집화 문제는 거리 축 상에 한 점으로 대응된 가열 선들 사이에 이들을 구분하는 경계선의

수와 위치를 결정하는 문제로 사상된다. 본 알고리즘에서는 거리 축 상에서 군집 수(k)를 증가시키면서 반복적으로 군집화하여 가장 좋은 군집화 방안을 구하였다. 각 군집화 방안에 대한 평가를 위해서 식2와 같이 일반적으로 사용되는 cluster utility[8]를 적용하였다.

$$CU(C_1, C_2, \dots, C_k)$$

$$= \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k p(C_l) \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{\sigma_{거리,l}} - \frac{1}{\sigma_{거리}} \right) \quad (2)$$

4. 실험 결과

본 알고리즘은 인공 부재와 실제 부재를 대상으로 실험되었다. 인공 부재는 실제 부재의 형상을 유사하도록 임의의 곡면을 인위적으로 만들어졌고, 실제 부재는 현장에서 작업된 부재를 대상으로 3차원 계측을 통해 만들어졌다. 본 알고리즘의 정확한 검증을 위해서는 많은 수의 다양한 실제 부재를 대상으로 가열 선들을 생성하고 가열하여 그 결과를 분석하는 과정이 필요하다. 그러나 현장 여건 어려움으로 본 논문에서는 대표적인 몇 가지 부재를 대상으로 가열 선을 생성하고 이에 대한 현장 전문가를 통해 검증을 받는 수준으로 실험하였다.

그림 13에서 그림 15까지의 예들은 인공 부재를 대상으로 가열 선을 생성한 예를 보여준다. 인공 부재들은 모두 현재 형상을 평면으로 가정하였고, 목적 형상들은 비틀림 부재, 외종곡 부재, 내종곡 부재들의 형상에 맞게 인의적으로 생성되었다. 그림 13에 나타낸 부재는 외종곡 형상이면서 비틀림이 있는 부재이다. 이 비틀림 부재에 대해 생성된 가열 선은 부재의 좌측 상단에서 우측 하단 방향으로 배치되어 있다. 목적 형상에서 부재의 상단 경계선(진한 굵은 실선)과 하단 경계선(연한 굽은 실선)을 비교해보면 가열 선 방향으로 가열 작업을 해야 비틀림 량(그림 4 참조)을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림 14와 15은 각각 외종곡 부재와 내종곡 부재를 대상으로 종곡 맞춤 시 생성된 가열 선을 보여준다. 종곡을 맞추기 위한 중간 목적 형상에서는 횡곡들은 가능한 제거되기 때문에 현재 형상인 평판과 함께 생성된 가열 선들은 횡 방향으로 거의 직선의 형태이다. 그림 15의 내종곡 부재는 등기울기선으로부터 생성된 가열 선에 삼각 가열 패턴을 배치한 모습을 보여 준다. 삼각 가열 패턴을 배치할 때는 부재의 종 방향과 나란한 양쪽 경계선(그림에서 부재의 좌우측 경계선)에 배치되었는데, 횡 방향 경계선(그림에서 상하단 경계선)에 너무 가까운 가열 선에는 삼각 가열 패턴이 배치되지 않은 모습을 볼 수 있다.

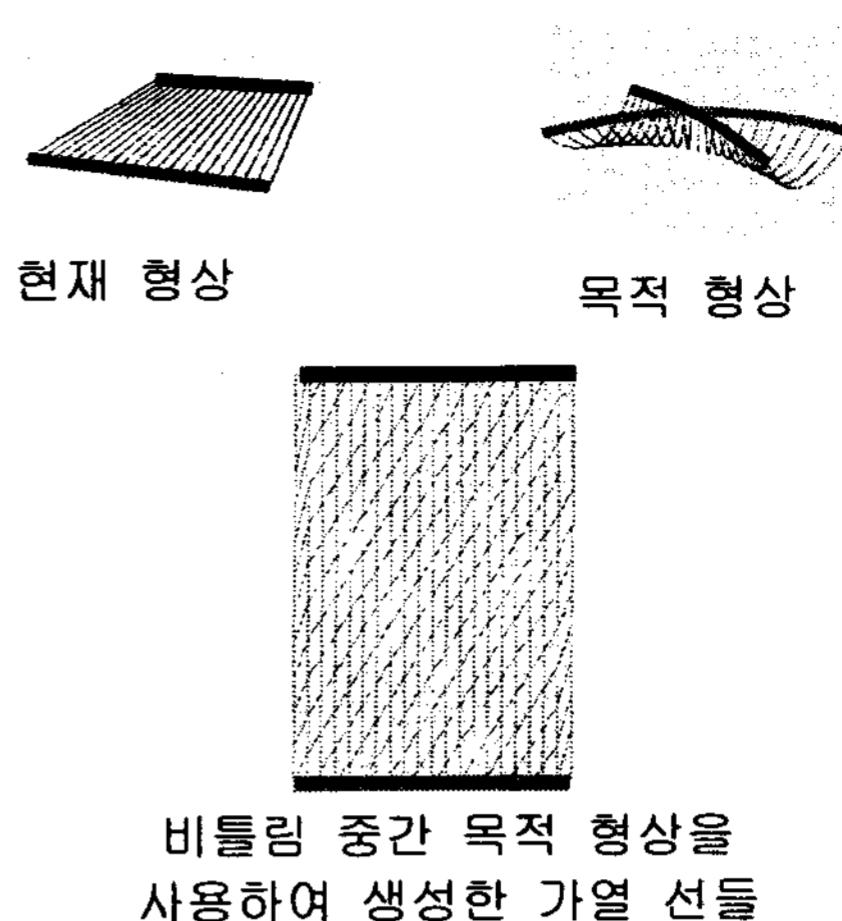


그림 13- 인공 외종곡 부재의 비틀림 맞춤 작업에 대한 가열 선 생성 예

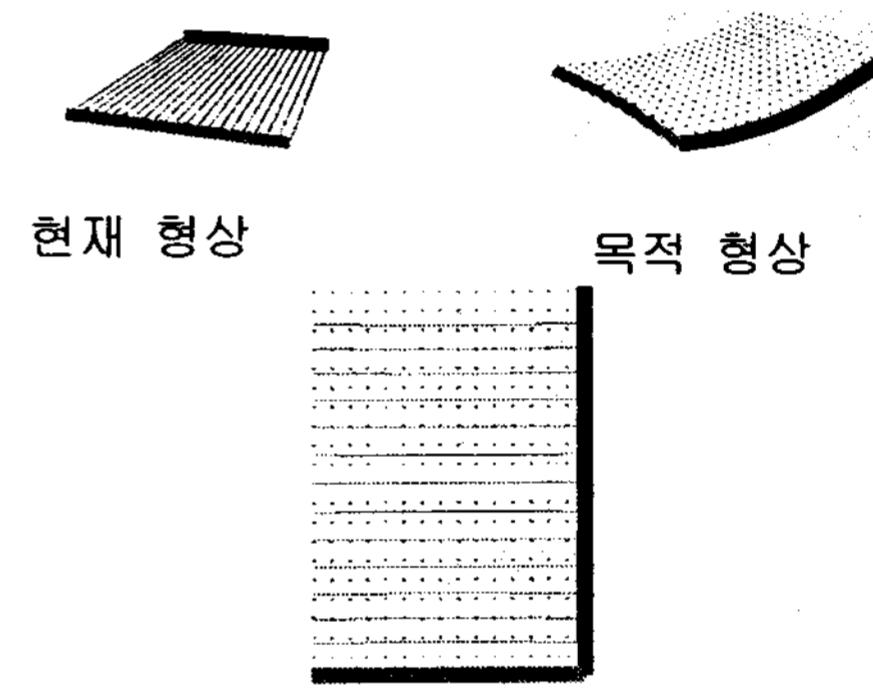


그림 14- 인공 외종곡 부재의 종곡 맞춤 작업에 대한 가열 선 생성 예

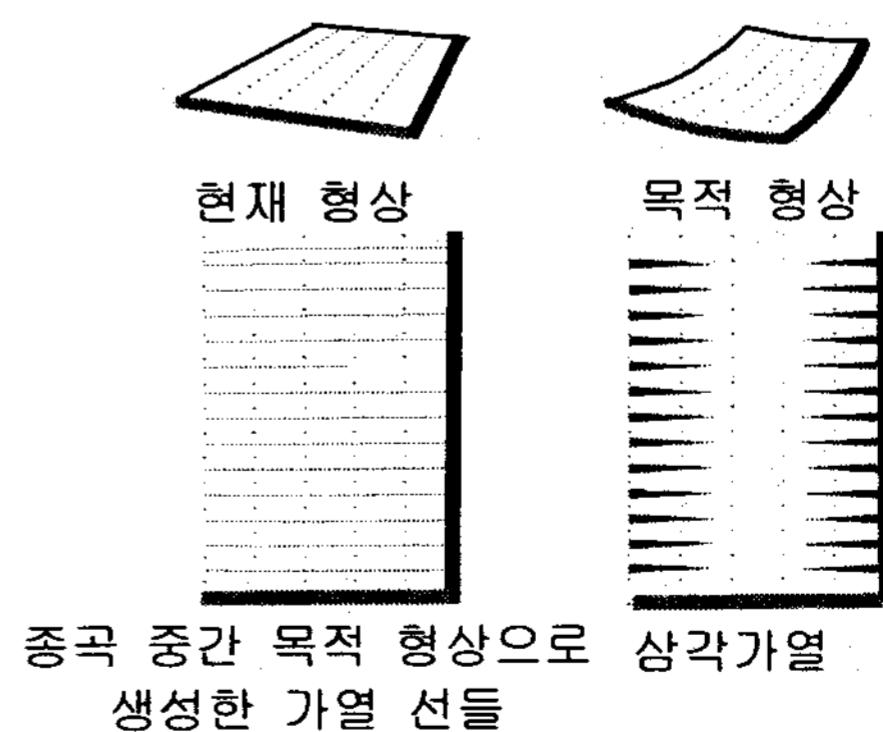


그림 15- 인공 내종곡 부재의 종곡 맞춤 작업에 대한 가열 선 생성 예

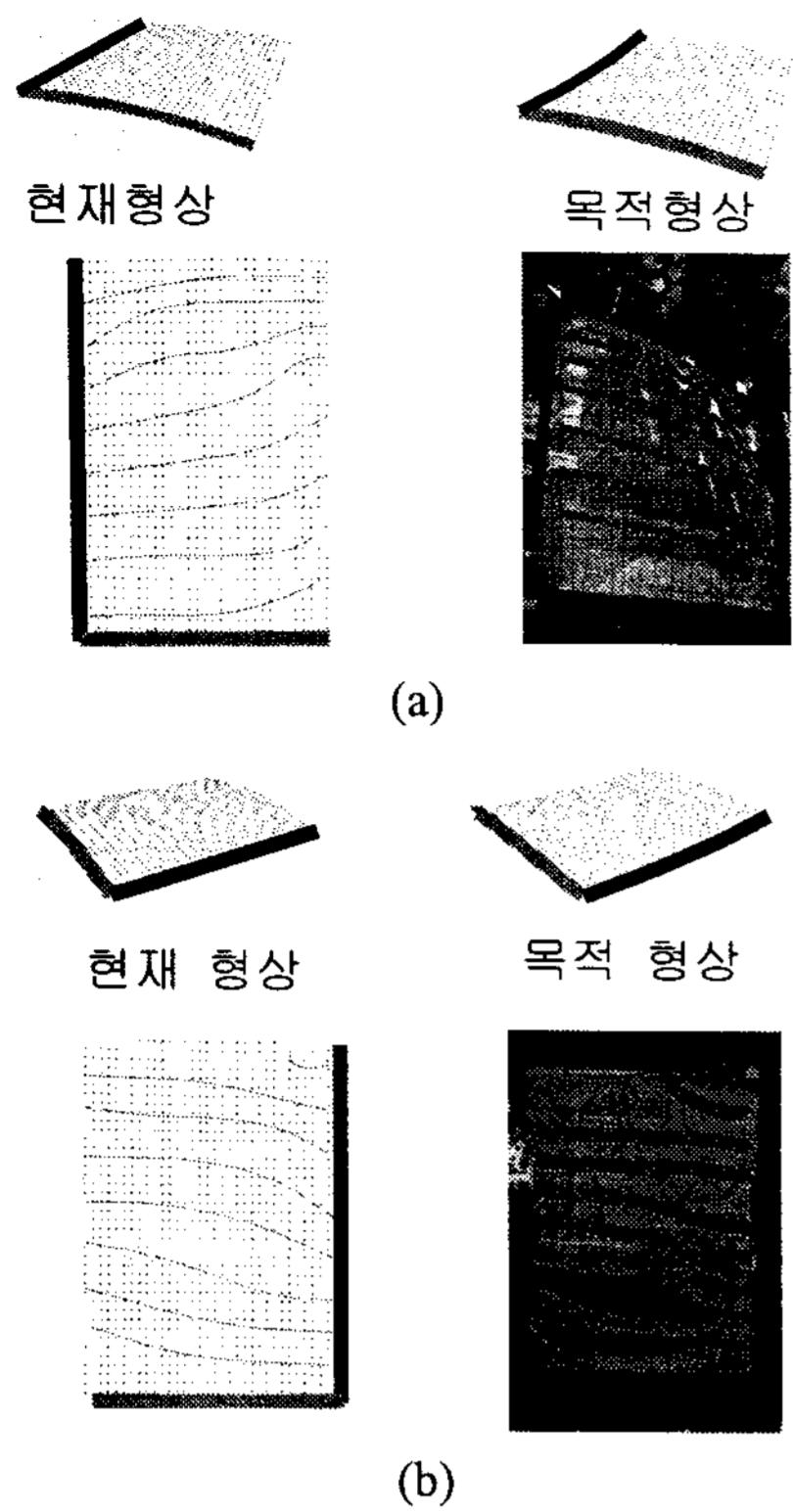


그림 16- 외종곡 부재에 대한 가열 선 생성 예
(실 부재)

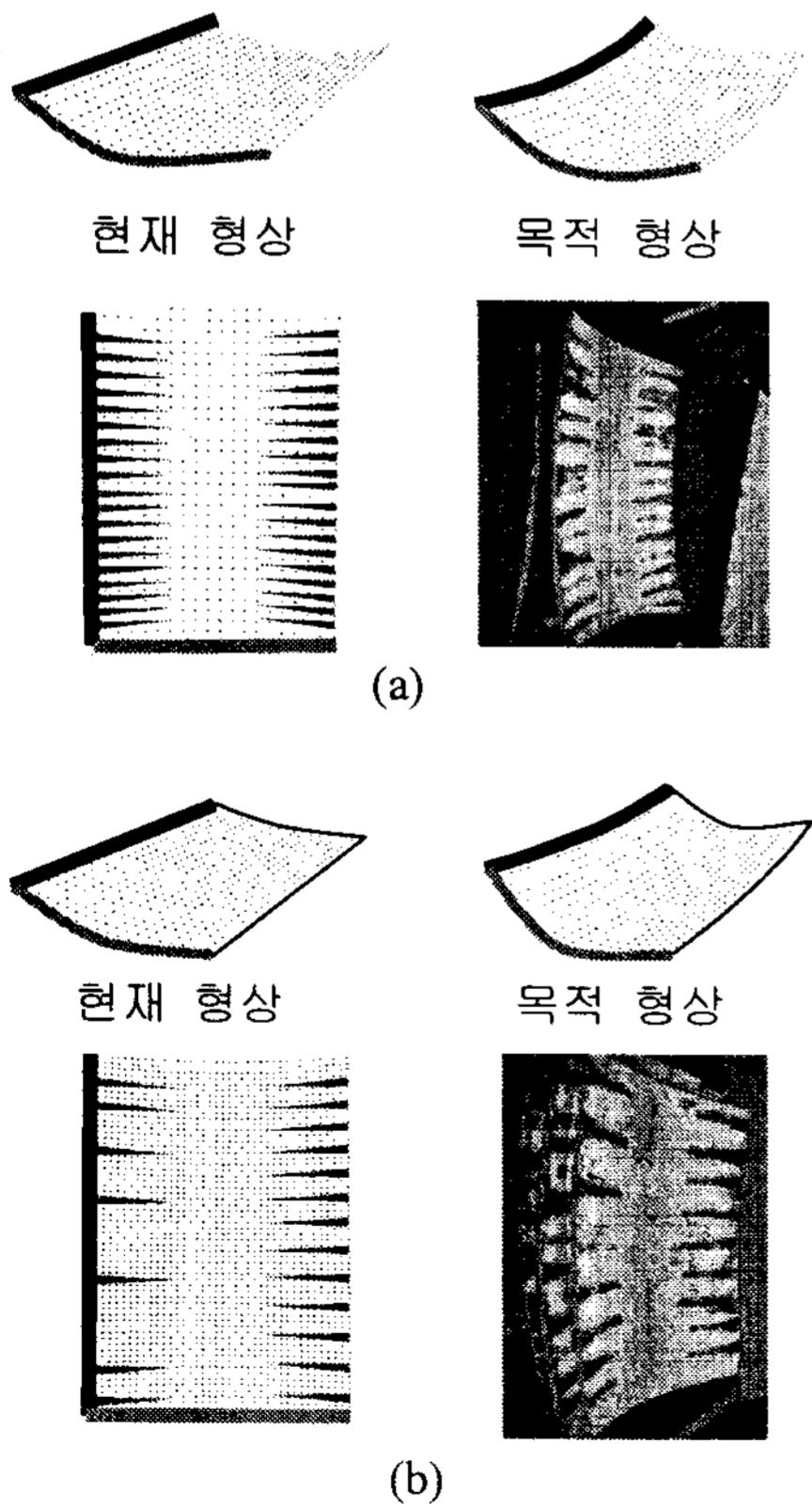


그림 17- 내종곡 부재에 대한 가열 선 생성 예
(실 부재)

그림 16과 그림 17에서는 실제 부재를 대상으로 종곡 맞춤 작업의 가열 선을 생성한 실험이다. 현장 작업자가 생성하여 작업한 실제 가열 선(사진의 굵은 실선)과 비교를 통해 유사한 가열 선들이 생성됨을 볼 수 있다.

그림 16은 형상이 조금 다른 두 외종곡 부재들이다. 현재 형상은 냉간가공을 통해 횡곡이 어느 정도 맞춰진 상태이다. 그림 16-(a)와 그림 16-(b)의 부재는 서로 다른 방향으로 비틀림 양이 약간 있었는데, 생성된 가열 선의 방향에 반영되어 나타나 있다. 그림 17은 내종곡 부재들에 대한 실험 결과이다. 등기울기선을 바탕으로 가열 선을 생성한 후 각 가열 선과 경계선이 만나는 지점에 삼각 가열 패턴을 배치한 결과이다. 그림 17-(a)는 대체로 좌우 대칭인 형상이어서 실제 가열 선과 같이 삼각 가열 패턴들이 양쪽 경계선에 나란히 배치되었다. 반면 그림 17-(b)의 부재는 좌우 대칭이 아닌데, 실제로 배치된 삼각 가열 패턴과 유사하게 좌측에 비해 우측 경계선에 더 많은 삼각 가열 패턴들이 배치되었다.

그림 18은 비틀림 맞춤 작업과 종곡 맞춤 작업에 대한 도그 및 반목 배치의 결과를 보여 준다. 그림 (a)와 같이 가열 선이 배치되었을 때는 도그는 가열 선 방향으로 대각선의 양 꼭지점에 도그가 배치(그림에서 작은 사각형)되었고 반대편 대각 방향의 양쪽 꼭지점에는 반목이 배치되었다. 그림 (b)와 (c)는 외종곡 부재를 대상으로 (그림 14 부재와 그림 16-(a) 부재) 종곡 맞춤 작업 시 생성된 가열 선에 도그 및 반목 배치한 결과이다. 도그는 부재의 종곡 경계선(그림에서 좌우측 경계선)에, 반목은 횡곡 경계선(그림에서 상하단 경계선)에 배치되었다. 그림 18-(b)의 부재는 비틀림이 없고 부재의 좌우측 양쪽 경계선의 종곡 모양이 같기 때문에 도그의 위치가 서로 대칭으로 배치되었다. 반면 그림 18-(c)의 부재는 비틀림이 조금 있기 때문에 가열 선이 (그림에서 좌측 하단에서 우측 상단 쪽으로) 조금 비틀어져 있고, 이에 맞춰 오른쪽 경계선의 도그들의 위치가 좌측에 비해 약간씩 위쪽으로 치우쳐져 있다.

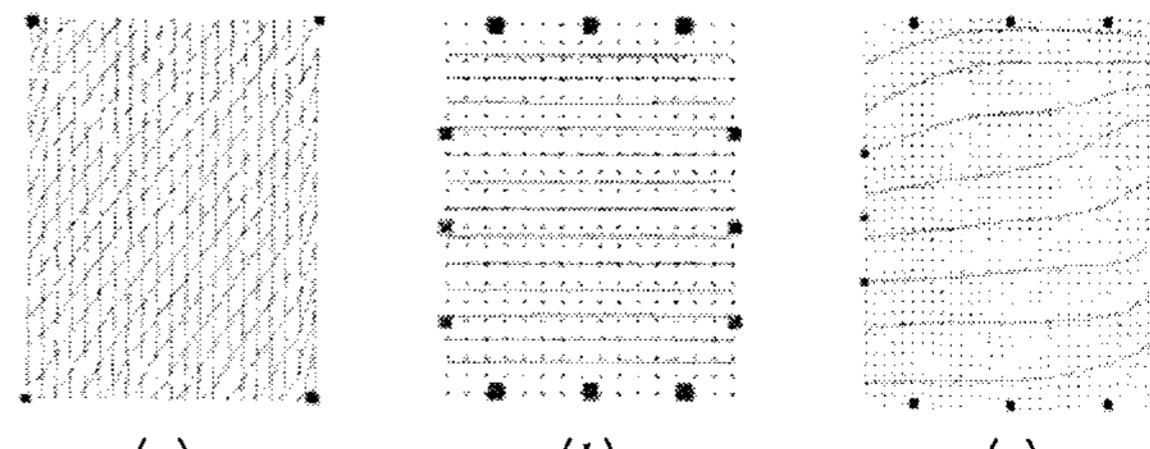


그림 18- 도그 및 반목의 배치 예

5. 결론

본 논문에서는 선체 외판의 곡 성형을 위한 가열 계획을 자동으로 수립할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 현장 전문가의 지식에 기반한 이 휴리스틱에서는 전문가가 대상 문제를 분할해서 단계적으로 접근하는 방식을 도입하였다. 즉 부재에 대해 현재 형상과 최종 목적 형상을 바탕으로 작업 단계를 결정하고, 작업 단계에 맞는 중간 목적 형상을 적절히 생성하여 각 작업 단계에서 전문가가 생성하는 가열 선과 유사한 가열 선을 생성할 수 있도록 등기울기선에 기반한 가열 선 생성 알고리즘을 제안하였다. 또한 가열 단계에서 예상하지 못한 변형을 방지하면서 작업 시간을 줄이기 위해서 사용되는 외력의 위치를 결정하는 알고리즘을 제안하였다. 현장에서 데이터 확보의 어려움으로 비록 많은 부재를 대상으로 실험하기 어려웠으나, 대표적인 형상의 부재들을 대상으로 실험한 결과, 제안하는 휴리스틱이 숙련된 전문가가 수립한 가열 계획과 유사한 가열 계획을 수립할 수 있음을 확인하였다.

후기

본 논문은 산업자원부의 지역산업기술개발과제 (10024272)의 일부로 수행된 것을 정리한 것으로 위 기관의 후원에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] Kitamura Yoshiaki Sakai, Hiroshi Murayama, (1999). “3-Dimensional Line Heating System for Curved Shell Plate for Ship Building”, ICASS99, pp. 351-366.
- [2] Chang Doo Jang, Sung Choon Moon, Dae Eun Ko, (2000). “Acquisition of Line Heating Information for Automatic Plate Forming”, Ship Structure Symposium
- [3] Aamodt, A., Plaza, E., (1997). “Case-Based Reasoning: Techniques for Enterprise System”, Morgan Kaufmann Publishers
- [4] 정재룡, 신하용, 박세연, 도영칠 (2004). “사례 기반 추론에 의한 선박 곡 가공 가열 계획 시스템에 대한 연구” 2004 한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집
- [5] Jain, R., Kasturi, R. Schunck, B.G. (1995). “Machine Vision”, McGraw-Hill, pp. 140-162.
- [6] Hand, D., Mannila, H., Smyth, P., (2001). “Principles of Data Mining”, Massachusetts Institute of Technology, pp. 59-62, 284-287.
- [7] 장창두, 고대은, 김병일, 박정웅 (2001). “열간가공에 의한 판의 변형특성에 관한 실험적 연구”, 대한조선학회논문집 Vol. 38(2), pp. 62-70.
- [8] 장창두, 고대은, 문성준, 서용록 (2001). “삼각가열에 의한 판 변형의 시뮬레이션”, 대한조선학회논문집 Vol. 38(4), pp. 66-74.
- [9] Witten, Ian H., Frank, Eibe (2005). “Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques”, Morgan Kaufmann