

선상가열법에 의한 강판의 곡가공 실험 연구*

이주성
수송시스템공학부

<요 약>

선체 외판을 구성하는 곡면의 가공은 선박생산에서 대단히 중요한 위치를 차지하고 있는 공정 중 하나이다. 선수미부에서 볼 수 있는 두 축방향으로 곡률이 있는 곡면의 경우 현재 선상가열법이나 삼각가열법에 의한 열가공법을 적용하여 가공하고 있다. 본 논문에서는 선상가열법에 의한 곡가공에 대한 실험을 수행하고 분석한 결과를 다루었다. 여기에서는 횡방향 뿐만 아니라 종방향으로도 곡률을 갖고 있는 곡면 형상의 가공에 사용되는 삼각가열을 구현하기 위해 선상가열법을 변형하여 그 효과를 나타낼 수 있는 실험을 수행하였다. 다수의 실험모델에 대한 실험결과를 가공의 효과 측면에서 분석한 결과 현장에서의 삼각가열의 효과를 변형된 선상가열법을 적용해서 구현할 수 있음을 알 수 있었고 또한 안형곡면의 가공에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

Experimental Study on Steel Plate Forming by Line Heating

Joo-Sung Lee
School of Transportation Systems Engineering

<Abstract>

Plate forming is well known process as one of the most important in ship buildings. For the curved plate in bow and stern part which has curvatures in two directions is formed by applying heating method such as line and triangular heating methods. This

* 이 논문은 2000년 울산대학교 교비 연구비의 지원으로 수행된 연구결과임.

paper is concerned with the experimental study of plate forming by line heating. In this study the traditional line heating method is modified to simulate the triangular heating effect for the pillow shape curved surface which has longitudinal curvatures as well as transverse curvature. This modified line heating method has been applied to several plate models and the results are analysed from view point of efficiency of plate forming. From the present study it has been found that the effect of triangular heating can be simulated by applying the modified line heating method and it can be effectively applied to forming of pillow shape curved surface.

1. 서론

선박의 크기에 따라 다르지만 선체 외판은 대형선박의 경우 약 40%, 중소형 선박의 경우 약 60~70%가 곡면으로 되어 있다. 이러한 곡면의 가공 (plate forming)은 선박 건조과정 때 중요한 위치를 차지하고 있는 공정으로서, 그 작업방법에 따라

- (1) 프레스 (press)를 이용하는 순수 냉간가공 (cold bending)
- (2) 1차 냉간가공 후 선상가열과 삼각가열에 의한 열가공
- (3) 선상가열 및 삼각가열에 의한 순수 열가공

으로 분류할 수 있다. 선체 중앙부의 bilge plate와 같이 곡면의 길이방향으로 곡률이 일정한 경우에는 냉간가공만으로 곡면을 성형할 수 있으나 선수미부에서 흔히 볼 수 있는 두 방향으로 곡률을 갖는 경우 냉간가공 후 열가공법을 적용하여야 한다. 이러한 곡면형상의 가공에 대한 자동화를 목표로 한 연구가 지난 20여년간 활발히 이루어져 왔으나 아직도 작업자의 숙련도에 의존하고 있는 실정이다[1-8].

열가공법 중 선상가열은 가열선 방향으로 속도의 변화가 일정하며, 따라서 입열량도 일정하여서 가열선 방향으로 균일한 변형을 얻고자 할 때 사용한다. 한편, 삼각가열은 가열선 방향으로 열원의 이동속도에 변화를 줌으로서 입열량이 가열선 방향으로 비례적으로 입열된다. 그러므로 가열선 방향으로 입열량을 불균일하게 주어 가열선 방향으로 불균일한 변형을 얻고자 할 때 효율적으로 사용되어서, 선상가열법을 적용할 때 가열선의 수가 많아 짐으로 인해 재질이 변화하고 강도가 저하되는 문제점을 상당히 보완할 수 있다. 선수미부의 곡면은 곡률의 분포형상에 따라 비틀형곡면 (twisted shape curved surface), 안형곡면 (pillow shape curved surface) 그리고 심형곡면(saddle shape curved surface)로 분류할 수 있다. 안형곡면과 심형곡면은 횡방향 뿐만 아니라 종방향으로도 곡률을 갖기 때문에 횡곡을 성형한 후 종곡을 성형하는 과정을 거치는데, 이때 선상가열법 (line heating method) 보다 종곡을 성형하는 데 더 효과적인 삼각가열법 (triangular heating method)을 적용한다. 곡가공 공정의 자동화 측면에서 본다면 선상가열법은 기계화를 통해 용이하게 구현할 수 있으나 삼각가열법을 기계제어를 통해 구현하는 것이 쉽지 않은 실정이다. 따라서 곡가공의 기계화에 효율적으로 적용할 수 있는 삼각가열법에 대한 고안이 필요하다[9].

본 논문에서는 안형곡면이나 심형 곡면의 종곡을 성형할 때 적용되는 삼각가열의 효과를 구현할 수 있도록 선상가열법을 변형하여 적용해 보았다. 여기에서 제안하는 변형된 선

상가열법은 가열선 방향으로 입열량을 조절하고자 함이다. 본 연구에서는 삼각가열을 구현하기 위해 변형된 선상가열법을 적용하여 다수의 강판모델에 대한 실험을 수행하였고 그 결과를 그러한 가열법의 적용으로 인한 가공의 효과 측면에서 분석하였다. 실험결과와 분석으로부터 현장에서의 삼각가열의 효과를 변형된 선상가열법을 적용해서 구현할 수 있음을 알 수 있었고 또한 안형곡면의 가공에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

2. 변형된 선상가열법

현재 현장에서 적용하는 삼각가열법은 여러 형태가 있는데, Fig.1에 보니 두 가지 방법이 주로 사용된다. 전술한 바와 같이 가열장치의 기계화 측면에서 볼 때, 가열도구로서 토치를 사용할 경우 강판 표면에서 토치 끝까지의 거리를 일정하게 유지하는 등 가열의 효율을 높이기 위한 방안을 포함해서 Fig.1에 보인 가열방법을 구현하도록 가열장치를 제어하는 것이 용이하지 않고, 더구나 최근 가스토치를 대체할 가열도구로서 많은 연구가 진행되고 있는 고주파 유도 가열장치를 이용할 경우에는 현장에서의 가열방법을 기계장치로 구현하는 데에는 상당한 어려움이 따른다. 삼각가열의 목적은 가열선 방향으로 입열량을 변화시키는 것이고 이는 열원의 속도를 변화시켜서 피할 수 있다는 점에 착안하여 본 연구에서는 Fig.2에 보인 바와 같이 판의 변에서 안쪽방향으로 두 가열선을 여러 개의 가열선소 (heating segment)로 나누어서 각 부분의 가열속도를 달리 함으로써 입열량에 변화를 주는 방법을 채택하였다. 이때 판의 변쪽보다는 변쪽에 입열량이 커야 된다는 점을 고려해서 판의 변쪽에 가까운 가열선소에서의 가열속도가 서서히 감소하도록 가열한다. 가열은 Fig.2에서 가열선소 L1 ⇒ L2 ⇒ L3 ⇒ R3 ⇒ R2 ⇒ R1 의 순서대로 가열한다. L과 R은 각각 좌측과 우측 가열선소를 의미한다. 가열선소의 배치는 전체적으로 삼각형 모양이 되고 가열속도는 삼각형의 중심선 (삼각형의 높이)에 대해 대칭이 되도록 한다. 이렇게 하는 이유는 삼각가열을 그대로 구현하고자 하는 것이 아니라 판의 변에서 안쪽으로 향하는 좌측 가열선과 안쪽에서 변으로 향하는 우측 가열선이 중복되지 않도록 하고 좌우 가열선소들의 중심선에 대해 입열량이 대칭이 되도록 하기 위함이다.

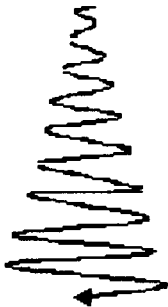


Fig.1 Triangular heating method in ship yard

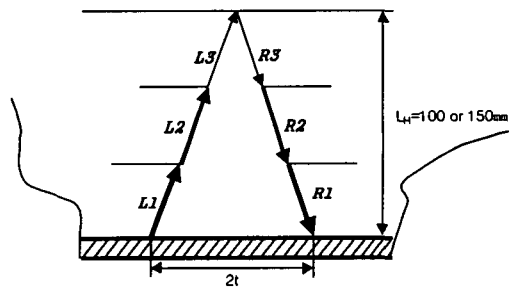


Fig.2 The modified line heating method for the present study

3. 가열실험

3.1 실험모델 및 조건

실험은 판 두께, 가열위치, 가열선의 길이 그리고 가열순서에 따라 Table 1과 같이 8개의 모델에 대해 수행하였다. 실험에 사용된 강판은 폭×길이는 400×500mm인 직사각형 판이고, 재질은 공칭항복응력이 $\sigma_y = 235\text{N/mm}^2$ 이고, 탄성계수가 $E = 206,000\text{N/mm}^2$ 인 연강(mild steel)이다. 이하의 설명에서 L_H 는 가열선의 길이로서, 가열선의 시작점과 끝점사이의 거리이다. 가열실험시의 열원으로는 아세틸렌가스이고 가열토치는 아세틸렌가스용 토치인 Tip-102-3 bar-3 (30~40mm)을 사용하였고, 실험조건은 Table 2와 같다. 또한 각 모델에 대한 가열속도는 Table 3에 표시하였다. 각 모델에 대한 가열선의 길이와 가열선의 수는 Table 1에 표시하였는데, 여기에서 일반적인 선상가열과 구분하기 위해 삼각가열을 구현하는 변형된 선상가열을 'triangular heating'이라고 정의하였다. Fig.3는 가열위치와 순서를 나타낸다.

Table 1 Experiment model

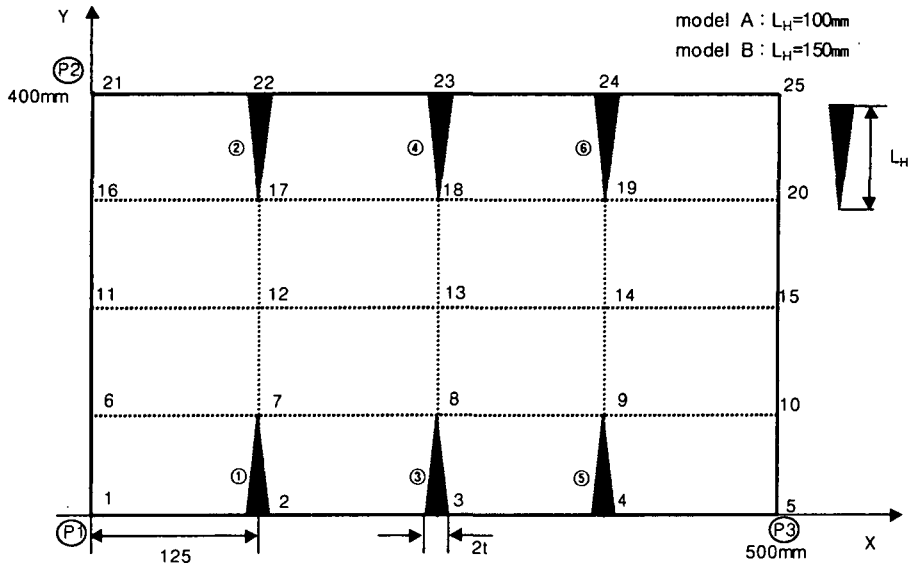
item model	thickness(mm)	length of triangular heating L_H (mm)	no. of triangular heating lines	remark
A1	9	100	6	triangular heating
A2	12	100	6	
B1	9	150	6	triangular heating
B2	12	150	6	
C1	9	150	6	line heating after triangular heating
C2	12	150	6	
D1	9	150	10	line heating after triangular heating
D2	12	150	10	

Table 2 Triangular heating conditions

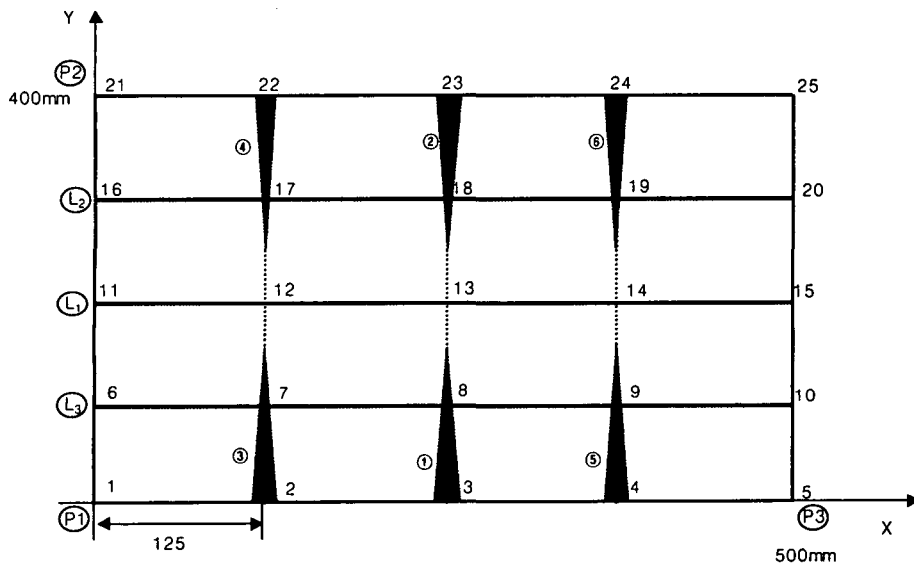
items	condition
type of tip	acetylene tip #102 3 bar 3 (30~40mm)
oxygen pressure	2.9~3.1 kgf/cm ²
acetylene pressure	0.42~0.44 kgf/cm ²
height of gas torch(H)	12.0~15.0mm
cooling method	water cooling after 30s air cooling

Table 3 Speed of line heating and triangular heating

method thickness(mm)	line heating(mm/min)	triangular heating(mm/min)
9	314.47	L1 ,R1 : 152.67
12	261.78	L2, R2 : 218.82
		L3, R3 : 285.71

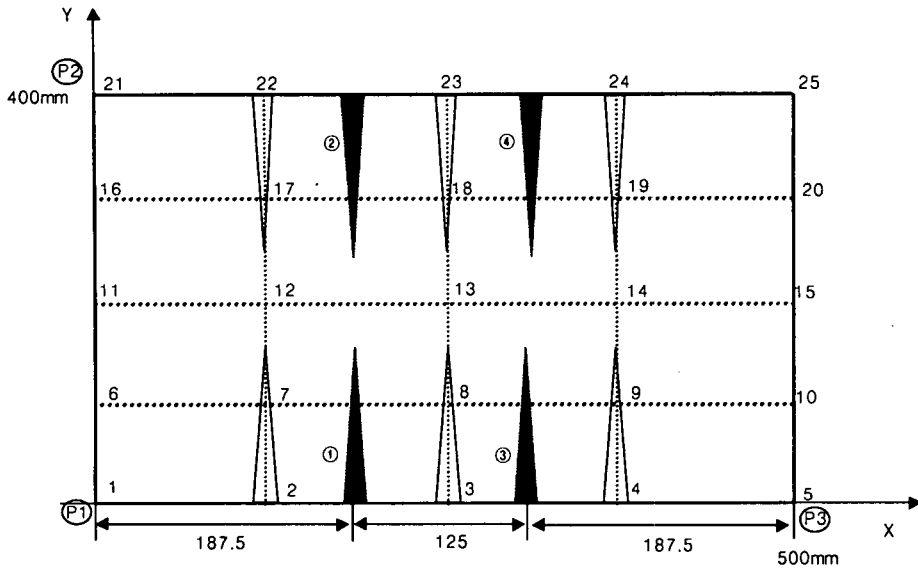


(a) model A and B



(b) model C

Fig.3 Heating order



(c) model D
Fig.3 (continued)

3.2 실험방법

가열장치로는 자동가스절단기를 사용하였고, 전술한 바와 같이 가열선을 다수의 가열선 소로 나누어서 각 가열선소 마다 속도를 조절하여 가열하였는데, 본 실험에서는 가열선소의 수를 3으로 하였다. 냉각방법은 수냉이다. 변형량은 각 가열선에 대한 가열과 냉각과정이 마친 후에 디지털게이지를 장착시킨 계측장치를 이용하여 Fig.4에 보인 25개의 격점점에서의 변위를 측정하였다.

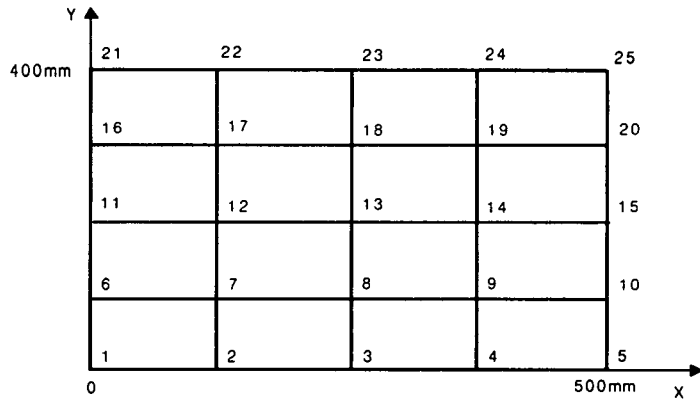


Fig.4 Deflection measuring points

4. 실험결과 및 고찰

4.1 model A와 model B series

model A series는 앞에서 전술한 Fig.3(a)에 보인 가열선의 순서대로, Fig.2의 가열방법에 따라 가열한 것이다. 가열선의 길이 L_H 는 모두 100mm이다. 판 두께는 9mm인 model A1에 대해 가열 후의 변형형상을 Fig.5에 보였다. Fig.5에서 보듯이 model A1에 대해서는 가열의 효과가 뚜렷이 나타나지 않았는데, 이는 실험시 모서리 부분에서 예열이 과다했고, 또한 판의 두께에 비해 속도가 낮아서 곧, 입열량이 많아서 판의 윗면과 밑면의 온도가 비슷하여 가열부의 국부적인 수축으로 인한 변형의 효과가 크지 않은 것으로 보인다. 한편 가열위치와 가열조건은 같지만 판 두께가 12mm인 model A2의 실험결과를 표시한 Fig.6을 보면 model A1과는 달리 약간의 종곡이 성형되어서 변형의 효과를 어느 정도 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안하는 가열방법으로 삼각가열의 경우처럼 국부적인 수축작용으로 횡곡이 성형될 것으로 예상했으나 결과에서 보듯이 종곡 (x방향으로의 곡)은 뚜렷하나 횡곡 (y방향으로의 곡)은 두드러지게 성형되지 않았음을 알 수 있다. model A series의 경우와 같은 방법으로 model B series에 대한 결과를 Fig.7에 그리고 model B2의 결과는 Fig.8에 각각 표시하였다. model A series의 결과와 비교해 보면 가열위치, 가열조건 그리고 가열선의 길이가 같음에도 불구하고 판 두께가 9mm인 model B1보다 판 두께가 12mm인 model B2에서 오히려 큰 변형이 발생했다. 이는 같은 가열상태에서 판두께가 클수록 발생하는 변형량이 작을 것으로 예상되는 점과는 상반된 결과인데, 아마 실험시 gas와 산소압력의 불안정성 때문으로 판단된다. model A의 결과와 비교해 보면 가열선의 길이가 100mm에서 150mm로 증가함에 따라 변형량이 증가되는 당연한 결과를 볼 수 있고, 또한 상당량의 종곡이 성형되었음을 볼 수 있는데, 이는 model B2의 결과인 Fig.8을 보면 더욱 뚜렷하다. Model A와 B series의 결과로부터 본 연구에서 제안하는 변형된 선상가열법을 적용할 때 굽힘에 의한 종곡과 아주 뚜렷하지는 않지만 수축에 의한 횡곡의 변화를 확인할 수 있다. 즉, 일반적인 선상가열과는 달리 본 연구의 가열방법을 적용하면 가열선 방향으로 입열량의 변화를 줄 수 있어서 삼각가열의 효과를 볼 수 있을 것이다.

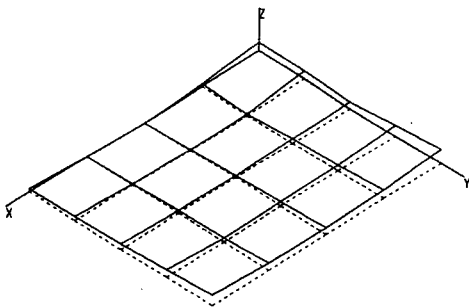


Fig.5 Three dimension deformed shape for model A1 (t=9mm)

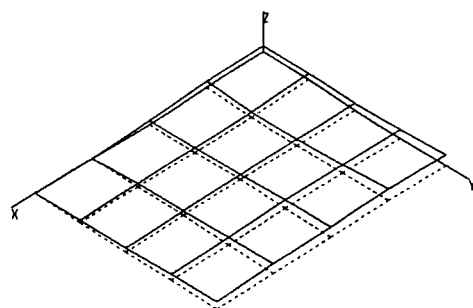


Fig.6 Three dimension deformed shape for model A2 (t=12mm)

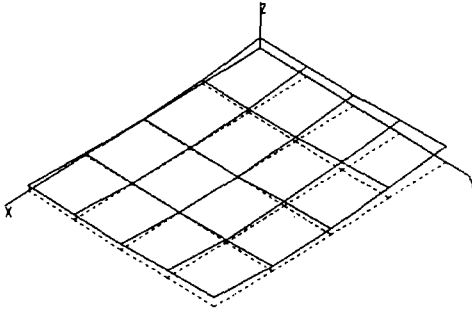


Fig.7 Three dimension deformed shape
shape for model B1 ($t=9\text{mm}$)

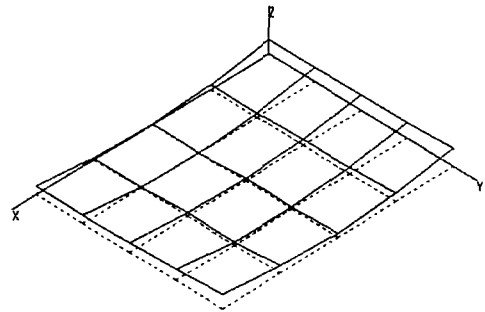


Fig.8 Three dimension deformed for model
B2 ($t=12\text{mm}$)

4.2 Model C와 D series

Model A와 B series에 대한 실험을 통해 본 연구에서 제안하는 변형된 선상가열법을 적용해서 어느 정도 삼각가열의 효과를 반영할 수 있다는 점을 알 수 있었다. 이점을 참고해서 model C series는 안형곡면이 성형되는 효과를 보기 위해 Fig.3(b)에 보인 것처럼 판의 길이방향 (x방향)으로 3곳의 위치 (Fig.3(b)에서 L_1, L_2, L_3 로 표시한 위치)를 선상가열한 후, Fig.3(b)에 보인 ①~⑥번의 위치를 가열하여 종곡이 성형되도록 하였다. 이는 현장에서 안형곡면을 성형하기 위해 프레스를 이용해서 먼저 횡곡을 성형하는 효과를 구현하는 것이다. Fig.3(b)과 같이 선상가열 후의 결과를 model C1과 model C2에 대해 각각 Fig.9와 10에 보였다. 가열선 방향으로 변형이 균일하지 않은 것은 선상가열시 판의 변 부분 (가열선의 시작점과 끝점 위치)에서 모서리효과 때문이다. Model C1과 C2에서 가열선의 길이는 $L_H = 150\text{mm}$ 로 같다. 가열 후 변형 형상을 전과 마찬가지로 Fig.11과 12에 보였다. 변형결과 그림으로 부터 안형곡면의 형상이 뚜렷이 성형된 것을 볼 수 있다. 또한, 예상한 대로 두께가 9mm인 model C1이 두께가 12mm인 model C2보다 더 많은 변형이 발생되었음을 볼 수 있다. Model D series는 횡곡의 변화를 파악하기 위하여 Fig.3(c)에 보인 것처럼 model C series의 가열선의 중간 위치를 추가로 가열한 모델들이다. 가열 후의 변형형상을 model D1는 Fig.13에, model D2의 결과는 Fig.14에 나타내었다. 이 결과로부터 본 연구에서 제안하는 변형된 선상가열로 인한 종곡은 물론 횡곡에도 상당한 영향이 있다는 것을 알 수 있다. 한편, 이미 예상한대로 가열선의 수가 많은 model D2가 종곡, 횡곡의 형상이 더 뚜렷한 것을 알 수 있다. 이는 가열선의 수가 증가할수록 수축에 보다 큰 영향을 준다는 점을 의미한다.

본 연구에서 제안하는 가열법을 적용할 때 곡률의 변화에 주는 영향을 분석하기 위해 model C와 D에 대해 midspan인 $x=250\text{mm}$ 위치에서의 곡률을 Fig.15와 16에 보였고, 이로부터 대략적인 가공의 효과를 확인할 수 있다. Fig.15와 16에서 보듯이 가열단계가 진행되면서 횡곡의 변화에 영향을 준다는 점을 알 수 있다.

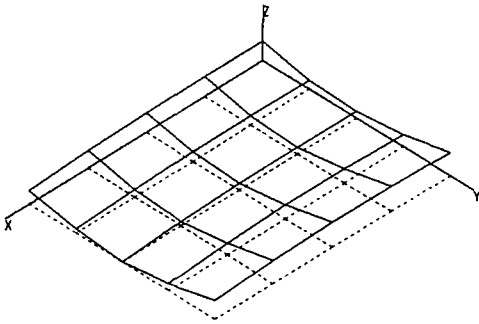


Fig.9 Three dimension deformed shape
deformed shape after line heating : model
C1(t=9mm)

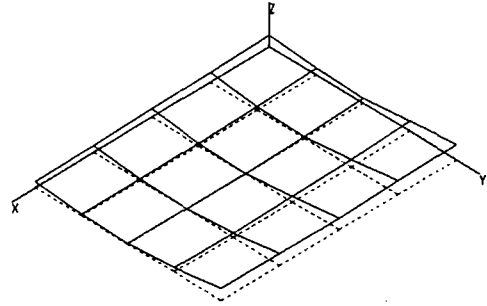


Fig. 3-16 Three dimension after line
heating : model C2 (t=12mm)

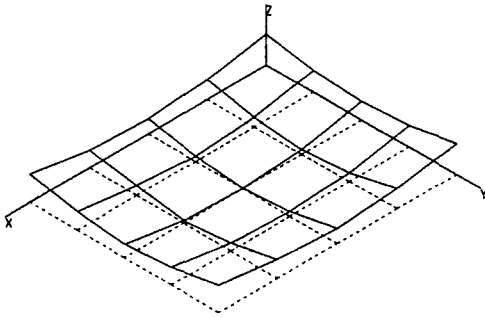


Fig.11 Three dimension deformed shape
shape for model C1 (t=9mm)

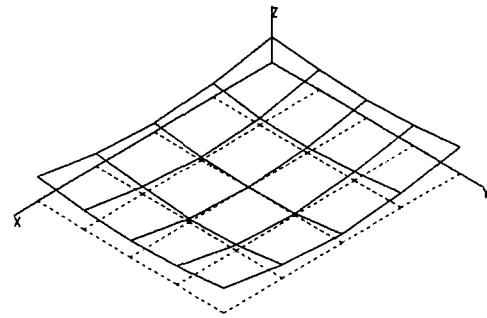


Fig.12 Three dimension deformed for
model C2 (t=12mm)

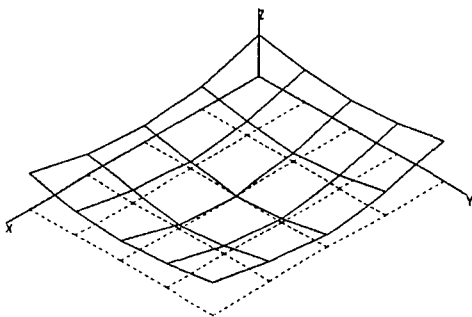


Fig.13 Three dimension deformed shape
shape for model D1 (t=9mm)

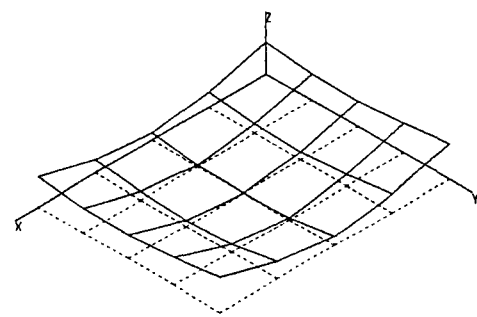


Fig.14 Three dimension deformed for
model D2 (t=12mm)

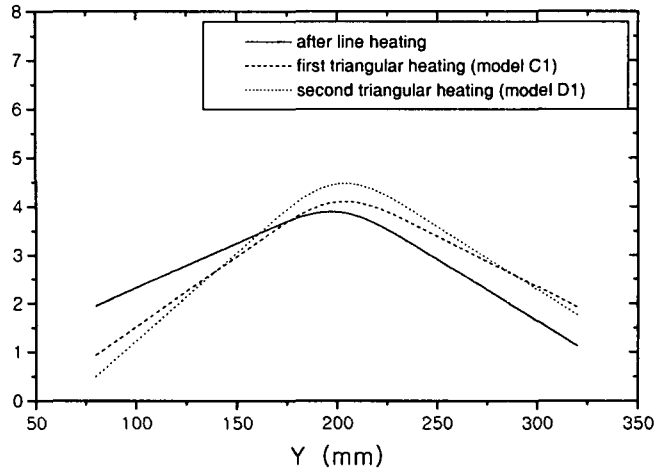


Fig.15 Curvature change to heating stage at x=250mm
: model C1, D1 (t=9mm)

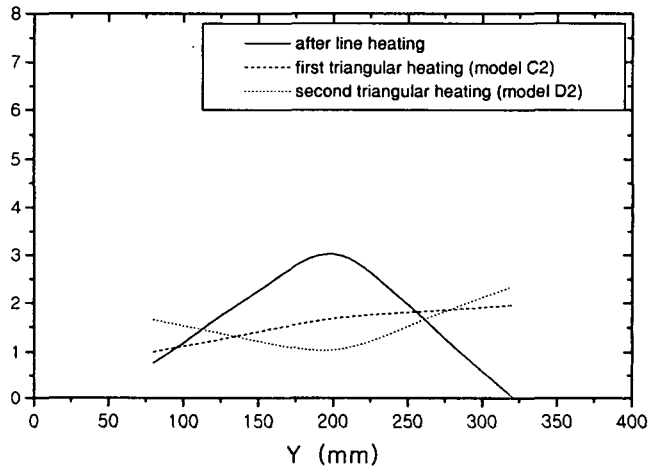


Fig.16 Comparison of curvature at x=250mm
: model C2, D2 (t=12mm)

5. 결 론

본 논문에서는 안형곡면이나 심형곡면 과 같이 두 방향으로 곡률을 갖는 곡면을 성형할 때 적용되는 삼각가열의 효과를 구현할 수 있도록 변형된 선상가열법을 적용한 한 실험 결과를 다루었다. 본 연구를 통해 여기에서 제안하는 변형된 선상가열법을 적용해서 안형 곡면이나 심형곡면과 같이 횡곡 성형 후 종곡을 성형할 때 효과적으로 적용할 수 있는 가능성이 있음을 발견하였다. 본 연구는 제안하는 가열방법으로 인한 변형의 결과를 정량적으로 분석하고자 함이 아니라 그 경향을 정성적으로 파악한 것인데, 차후에는 실험조건과 실험과정을 일관성 있게 적용함으로써 가열의 결과에 영향을 주는 인자들이 포함된 수식으로 정량화하는 것이 필요할 것이다. 본 연구의 결과를 가공의 효과 측면에서 분석한 결과, 곡가공 공정의 기계화를 위해 현장에서의 삼각가열의 효과를 변형된 선상가열법을 적용해서 구현할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Tsuji, I and Okumura, Y. ,“A Study on Line Heating Process for Plate Bending of Ship Steels”, 일본서부조선학회지, 제76호, pp.149~160, 1975.
2. Nomoto, T., Ohtsuka, M., and Yokoyama, T.,“Fundamental studies on the bending work using multiple-piston-pressing method for outside plate of ship”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170, pp. 587-598,1991.
3. Ueda et. al.,“Development of Computer Aided process Planning System for Plate Bending by Line-Heating”, J. Naval Architecture and Ocean Engineering, Society of Naval Architecture of Japan vol.31, pp. 99~111, 1994.
4. Toshiharu Nomoto, Kazuhiro 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.
5. 신종계,노인식,이광한, “유한요소해석에 의한 선상가열 변형 시뮬레이션”,대한조선학회논문집 제32권,제2호, pp. 75~83, 1995.
6. 장창두,문성춘, “선상가열법에 의한 강판 가공의 가열선 결정 알고리즘”, 대한조선학회논문집 제35권,제2호, pp. 104~113, 1998.
7. 이주성, “선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템(II)”,대한조선학회논문집 제33권, 제3호, pp. 81-93, 1996.
8. 이주성, “선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템(III)”,대한조선학회논문집 제34권, 제2호, pp. 85-89, 1997.
9. 이주성, “곡가공 수치제어 시스템개발”, 현대중공업(주)-울산대학교 산업기술연구소, 1996.