

굽힘 변형도를 이용한 선상가열 과정의 곡 퍼짐 현상에 관한 연구

박정서*, 김정*, 신종계**, 현충민***, 도영철***, 고광희†****

서울대학교 조선해양공학과*, 서울대학교 해양시스템공학연구소**
삼성중공업 산업기술 연구소***, 광주과학기술원 기전공학과****

Plate Flattening Analysis in Line Heating Process using Bending Strains

Jungseo Park*, Jung Kim*, Jonggye Shin**, Chungmin Hyun***, Youngchil Doh ***
and Kwanghee Ko†****

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University *
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University **
Institute of Industrial Technology, Samsung Heavy Industries Co.,Ltd.***
Department of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology ****

Abstract

In the line heating process, only angular distortion whose direction is perpendicular to that of a heating path is expected. However, it is observed that a deformation is induced in the direction of the heating line. Because of this, during forming a saddle type plate we experience unfavorable deformations in the unintended direction. In this paper we discuss the unwanted distortion in the manufacturing process by analyzing intermediate plates of saddle type during fabrication. For this analysis we consider the longitudinal and transversal directions separately and use the bending strain for the analysis.

※Keywords: Plate flattening(곡 퍼짐), Line heating(선상가열, 열간가공), Hull forming(성형), Strain(변형도), Bending strain(굽힘 변형도)

1. 서론

이중 곡면 형태의 선체 외판을 성형하는데 사용

되는 다양한 방법들 중 현장에서 가장 많이 사용되는 방법은 열간가공법으로, 이 가공법은 가열 형태에 따라 선상가열과 삼각가열로 구분되어 적용되고 있다. Fig. 1 과 같은 안장형 부재를 만들 때에는 주로 선상가열이, Fig. 2 와 같은 볼형 부재를 만들 때에는 많은 경우 삼각가열이 사용된다.

접수일: 2008 년 1 월 8 일, 승인일: 2008 년 6 월 17 일

†교신저자: khko@gist.ac.kr, 062-970-2384

특히, Fig. 1 과 같은 안장형 부재를 만들기 위해 사용되는 선상가열은 부재의 윗면과 아랫면을 모두 가열하여 가공해야 하는데, 윗면의 가공이 횡방향의 곡을 만들기 위한 것이라면 아랫면의 가공은 종방향의 곡을 만들기 위한 것이 된다. 가공의 방향이 다른 이유는 양쪽의 곡을 방향이 서로 다르기 때문이다.

안장형 부재처럼 서로 다른 면을 가공해야 하는 부재의 경우 한쪽 면을 가공할 때, 다른 면의 곡이 변형되지 않아야 가공이 수월하지만, 열의 특성상 이것이 불가능하다. 열간가공에 사용되는 열은 방향성을 갖고 있지 않기 때문에 한쪽 면의 곡을 만들기 위해 가열하게 되면 반대 면의 곡도 같이 변형되는 현상이 발생한다. 때문에 한쪽 방향의 곡을 완벽히 만들더라도 이후 다른 방향의 곡을 만드는 과정에서 기존의 만들어진 곡에도 변형이 생기게 된다. 일반적으로 이러한 변형은 곡이 퍼지는 형태로 변형이 발생하는데, 이러한 현상을 곡 퍼짐 현상이라고 지칭한다. 즉 곡 퍼짐 현상은 안장형 부재에 대한 선상가열 과정에서 종 또는 횡방향의 곡을 생성할 때, 두 방향의 곡을 만들기 위해 가열하는 면이 서로 다르기 때문에 각 방향에 대한 가공 시 다른 방향의 곡이 퍼지는 현상을 의미한다.

이러한 현상은 현장 작업자들 사이에서 일반적으로 인지되고 있지만, 이것이 얼마나 곡가공에 영향을 주는지에 관한 연구는 거의 전무한 상태이다. 단지 Lee and Shin(2002)의 선상가열 작업에서의 잔류변형과 가공 조건 사이의 무차원 관계에

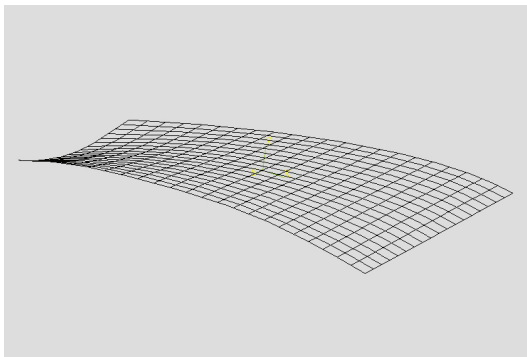


Fig. 1 Saddle type plate

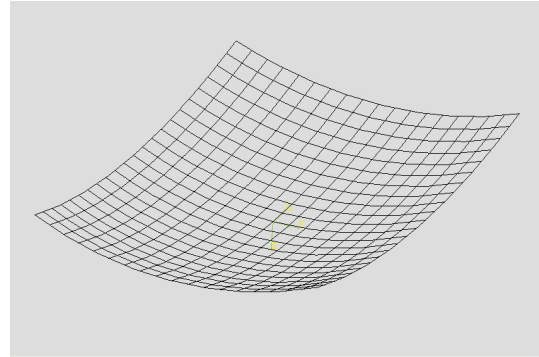


Fig. 2 Convex type plate

대한 논문에서 일부 언급되고 있다. 이 논문에서는 선상가열을 통해 원하는 변형을 생성하더라도 다른 쪽 방향(가열 진행방향)으로의 각변형도 발생한다는 사실을 보였는데, 당시의 연구는 곡 퍼짐 현상에 중점을 두지 않았기 때문에 수치적 결과에 대해서만 기술되어 있다.

이러한 현상을 분석하기 위해서는 어떠한 관점에서 분석할 것인지가 중요한 요소가 된다. 즉, 곡 퍼짐 현상이 발생하는지를 판단하기 위해 각변형을 보는 것은 각각 하나의 가열선 분석에 중요한 결과를 보여줄 수 있지만, 전체적인 현상을 관찰하기 위해서는 또 다른 판단 요소가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 현상을 분석하기 위해 굽힘 변형도(Shin and Ryu 2000, Ryu 2002)를 사용하였다. 굽힘 변형도는 목적하는 형상과 대상 형상 사이의 사상이 이루어져 있을 경우 계산이 가능한데, 두 형상 사이에 얼마만큼의 굽힘 변형 차이가 있는지를 각 위치 별로 판단하는 것이 가능하다. 이에 대한 자세한 설명은 2 장에서 다룬다.

굽힘 변형도를 이용해 곡 퍼짐 현상을 파악하기 위해서는 가열 단계 마다 어떠한 변형을 줄 것인지를 결정해야 하는데 이를 위해 가열정보 산출 방법 중 하나를 선정해야 한다. 선상가열을 위한 가열정보 산출 방법으로 Lee et al.(1994)과 Jang and Moon(1998)이 제안한 다양한 방법을 들 수 있는데, 이와 같은 다양한 가공정보 산출 방법 중 본 논문에서 중요하게 사용하는 변수인 굽힘 변형도를 사용하는 방법은 Shin et al.(2003), Park et

al.(2007b)등에 의해서 제안 되었다. 이들 논문에서는 굽힘 변형도를 가열선 산출의 중요한 변수로 사용하고 있는데, 본 논문에서는 반복적 가공정보 생성을 위해서 Park et al.(2007b)의 프로세스를 사용하였다.

본 연구에서는 굽힘 변형도를 이용하여 실제 곡 퍼짐 효과에 대해서 분석하고 실제 조선소에서 사용중인 부재를 이용해서 곡 퍼짐 현상의 영향을 확인해 보았다.

2. 수치 모델을 통한 곡 퍼짐 현상

2.1 굽힘 변형도

곡 퍼짐 현상을 정량화 하는 기준으로 언급한 굽힘 변형도는 주 굽힘 변형도(principal bending strain)를 의미한다. 주 굽힘 변형도는 두 가지 방향으로 계산되고 각 방향은 서로 수직관계에 있는데, Park et al.(2007b)이 제안한 반복적 열간가공 방법에서는 굽힘 변형도의 방향을 가공 정보를 산출하기 위한 주요 변수로 사용하고 있다. 즉 굽힘 변형도의 방향을 이용해서 가열선의 방향을 결정하는데, 아래 Fig. 3 과 같이 점 p1 으로부터 주 굽힘 변형도를 계산하고 각각의 방향을 기울기로 하여 가열선을 산출한다. 여기서 주 굽힘 변형도의 크기는 현재 가공중인 부재가 목적형상과 동일한 형상이 되기 위해 필요한 변형의 정도를 보여준다.

선상가열시 발생하는 곡 퍼짐 현상은 가열 과정에서 변형을 일으키고자 하는 방향(가열선의 수직방향)뿐만 아니라 그 수직방향(가열선의 방향)으로도 변형(여기서의 변형은 각변형을 의미한다)이

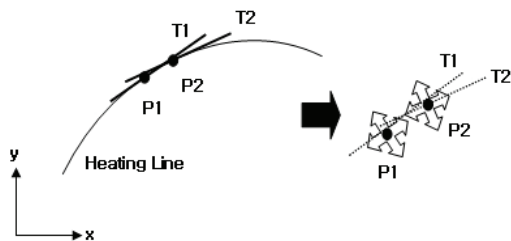


Fig. 3 Principle bending strains and heating information

발생하는 현상을 의미한다. 그리고, 이러한 현상을 확인하기 위해서는 각 방향에 따라 얼마만큼의 변형이 발생하는지를 수치적으로 확인해야 되는데, 본 연구에서는 이러한 현상을 확인하기 위해 주 굽힘 변형도의 방향과 크기를 사용하였다. 이 수치해석 결과를 사용하는 이유는 가열정보를 산출하는데 있어서 주요 변수로 사용하고 있기 때문에 의미 있을 뿐만 아니라, 그 방향이 가열선과 동일하며, 크기의 변화를 통해 변형 정도를 확인할 수 있기 때문이다.

이를 위해 전체를 300 여 개의 요소로 나누어 각 요소를 대표하는 굽힘 변형도 값을 사용하였다.

2.2 수치 모델을 통한 곡 퍼짐 현상

곡 퍼짐 현상에 대해 이론적으로 접근하기 위해서는 우선 선상가열의 원리에 대해서 살펴볼 필요가 있다. 선상가열을 통해 변형이 발생하는 원리는 다음과 같다.

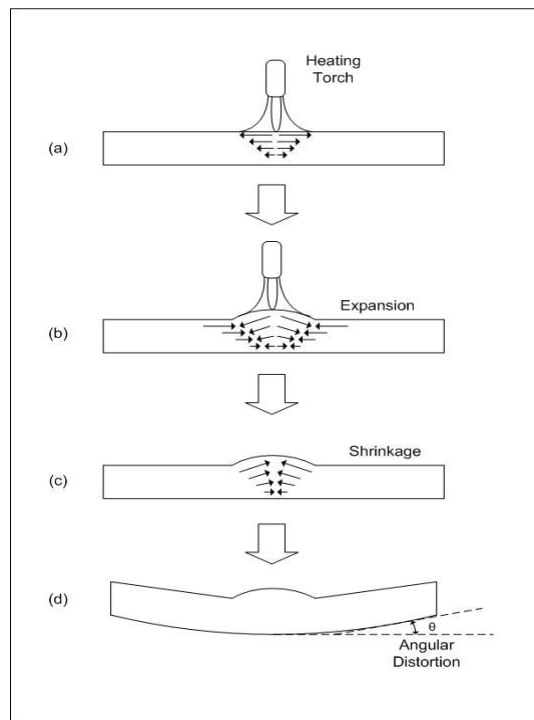


Fig. 4 Mechanism of plate forming by line heating(Park et al. 2007b, Storch et al. 1995)

선상가열은 강판에 국부적인 열을 주어 가열부가 팽창되고 이런 팽창은 비가열부에 의해 억제되게 된다. 억제된 가열부분은 강한 압축응력을 받으며 이 응력은 항복점을 넘어 가열된 부분을 소성상태로 만든다. 이후 소성변형이 유지된 채 냉각이 이루어지면 가열부가 냉각되어 강한 수축이 발생하고 이 수축력으로 인해 굽힘이 발생하는 원리이다. 즉 위 원리에 기반하여 가열하는 방향(가열선 방향)의 수직 방향에 대해 각변형이 유도되게 된다. 하지만 위와 같은 굽힘의 원리는 가열하는 방향으로도 적용되어 각변형을 발생하게 되는 것이다.

이와 같은 현상에 관련된 해석 데이터는 Lee and Shin(2002)의 선상가열 작업에서 잔류변형과 가공 조건 사이의 무차원 관계식에 대한 논문에서 언급되어 있다. 이 논문에서는 특정한 강판에 대해 가열 조건(강판의 두께, 가열속도 등)을 변화시켜 가면서 유도되는 잔류변형량을 계산하였다. 이 해석을 위한 모델로 Fig. 5에서 보여진 바와 같이 길이 200mm, 폭 600mm의 판을 고려하였고, 두께를 달리하여 사용하였다.

Fig. 5에 보이는 대상 판은 그 대칭성을 고려하여 반쪽 부분만 모델링하였으며, 가열 조건에 따른 잔류변형량을 도출한 결과는 아래 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 5에서 가열선의 방향은 AB 방향이고, 판이 가열된 후에 y 방향(폭방향)에 대해서만 각변형이 발생할 것으로 기대된다. 하지만 해석 데이터 결과를 보면 y 방향에 대해서 각변형이 발생한 것은 물론 Fig. 6에서 보인 바와 같이 x 방향(길이방향)에 대해서도 각변형이 유도된 것을 확인할 수 있다. 이런 해석적 결과는 앞서 언급한 선상가열에 의한 변형이 가열선 수직방향뿐만 아니라 가열선 방향에 대해서도 발생 함을 알 수 있다. 즉 선상가열시 작업자가 한쪽 방향의 곡을 맞춘 후에 다른 쪽 방향의 곡을 만들 의도로 가열을 하더라도 가열선 방향으로의 변형으로 맞춰 놓은 방향의 곡이 변형될 수 있음을 의미한다. 하지만 이러한 현상이 실제 조선소에서의 선상가열시 어떻게 얼마나 발생하는지에 대한 구체적인 연구는 아

직 이루어지고 있지 않았다.

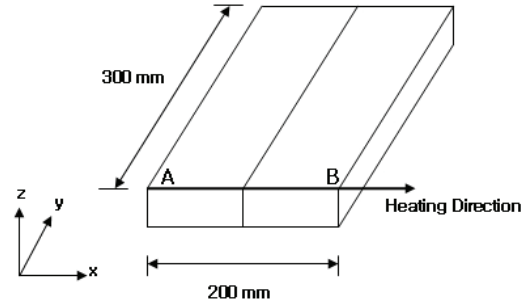


Fig. 5 FEM model

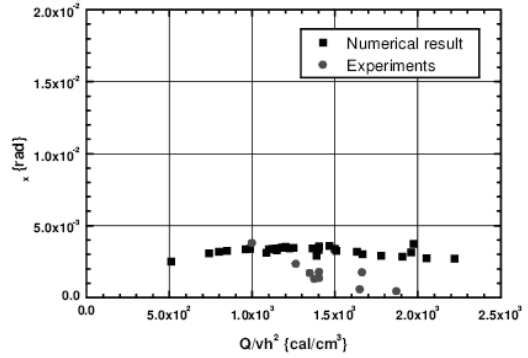


Fig. 6 Angular distortion in direction of line heating (Shin and Lee 2002)

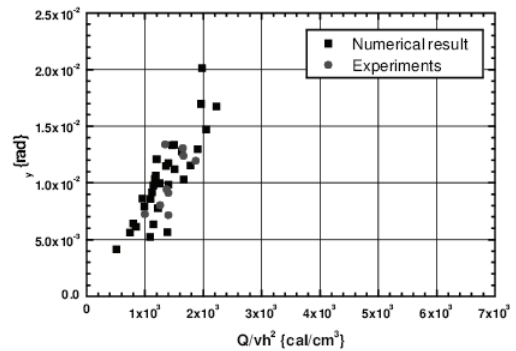


Fig. 7 Angular distortion in direction of perpendicular of line heating (Shin and Lee 2002)

3. 굽힘 변형도를 이용한 실부재의 곡 펴짐 현상

본 장에서는 앞의 수치 해석 결과를 바탕으로 실부재를 반복 가공하는 과정에서 나타나는 곡펴짐 현상을 굽힘 변형도를 이용해서 검증하고자 한다. 우선 실부재 테스트를 위해 사용되는 구속조건을 먼저 고려하여야 한다. 구속조건이란 조선소에서 사용하고 있는 “도그”와 “반목”을 의미하는데, 도그와 반목은 Fig. 8 에서 보이는 바와 같이 부재를 고정하고, 나아가 부재에 강제로 변위를 주어 가공효율을 높이도록 하는 기구이다. 대부분의 조선소에서 이와 같은 구속조건을 사용하고 있지만, 아직 구속조건 정보(구속을 주어야 하는 위치 정보와 강제 변위량)에 대한 연구는 전무한 상태이다. 본 논문에서는 구속조건을 고려하지 않은 상태에서의 굽힘 변형도 값의 변화와, 강제변위가 있을 때의 변화에 대해서 연구해 보았다. 아직 구속조건 정보에 관한 연구는 없는 관계로 본 논문에서는 구속조건 위치와 강제 변위량에 대한 정보는 숙련된 현장 작업자의 도움을 얻었다.

3.1 선수 부재 1번 - 단순 지지

첫 번째 실험 대상 부재로 현장 작업자로부터 가공이 쉽지 않다는 평가를 받는 선수부 부재를 사용하였다. 종방향의 길이가 긴 안장형 부재로 목적형상은 Fig. 9 와 같다.

본 부재의 경우, 가공과정에서 반목을 사용하지 않을 경우 부재가 심하게 요동쳐서 부재가공이 어려운 경우가 발생하기 때문에 반목을 두고 부재의 흔들림을 막아 가공을 수행하였다. 여기서는, 단순히 부재의 흔들림만을 막은 것을 의미하며 강제 변위량은 주어지지 않았다.

본 연구에서는 변형도와 가공정보 계산을 위해서 Park et al.(2007b)이 제안한 가공 정보 프로세스를 사용하였다. 일반적으로 계측형상은 목적형상과 서로 연관이 없는 데이터이기 때문에 목적형상과의 사상정보를 만들어야 변형도 계산 및 가공정보 생성이 가능한데, 이를 위해 가공정보 계산 프로세스에서도 제안된 바와 같이 Park et al.



Fig. 8 "Dog" and "Wooden Support" (Park et al. 2007b)

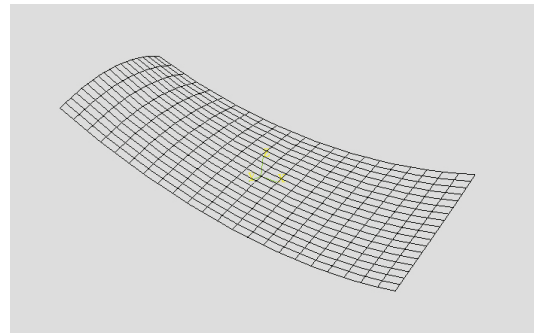


Fig. 9 3D information of designed surface(No. 1)

(2007a)이 제안한 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 최초의 목적형상과 전개형상 사이의 사상정보를 이용하여 계측형상의 사상정보를 추출할 수 있는 알고리즘으로 반복적 가공정보 생성을 가능하게 해주는 핵심 알고리즘이라 할 수 있다. 이러한 알고리즘과 프로세스를 바탕으로 부재를 반복 가열하였고, 굽힘 변형도를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 10 과 Fig. 11 에 나타내었다. 그림에서 굽힘변형도(Bending Strain)₁ 은 종방향의 곡을, 굽힘변형도(Bending Strain)₂ 는 횡방향의 곡을 의미한다.

Fig. 10 는 종방향의 곡을 만들기 위한 가공을 하고 난 후의 결과를 보여준다. 그림에서처럼 굽힘 변형도₁ 이 급격히 줄어드는 데에 반해 상대적으로 적긴 하지만, 굽힘 변형도₂ 가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 더불어 전체 굽힘 변형도의

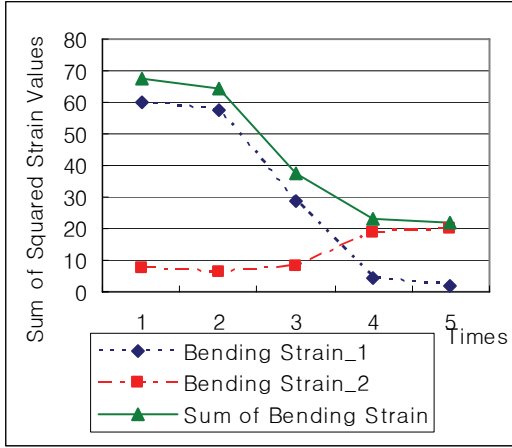


Fig. 10 A change of bending strains by heating on the upper side

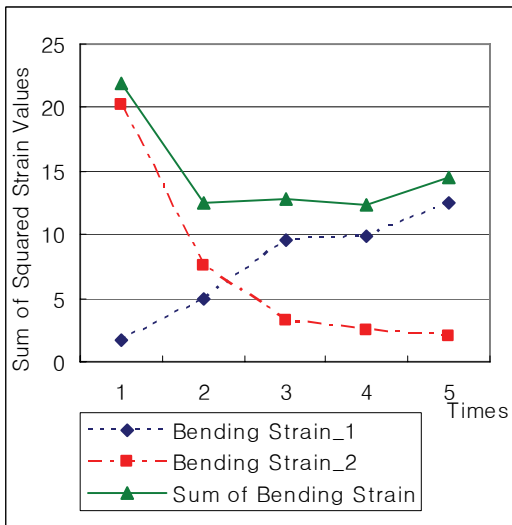


Fig. 11 A change of bending strains by heating on the lower side

합이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11 은 Fig. 10 의 4 회 가공이 완료된 후 부재를 뒤집어서 횡방향의 곡을 만드는 가공을 수행하는 과정에서의 굽힘 변형도 변화를 보여준다. 여기서 Fig. 10 의 5 는 Fig. 11 의 1 과 같다. Fig. 11 에서 보이는 것과 같이 Fig. 10 과는 반대로 굽힘 변형도

_2 가 감소하고 굽힘 변형도_1 은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 여기에서는 2 회 가공 이후에 발생한 곡 퍼짐이 의도한 변형보다 더 커서 오히려 전체적인 굽힘 변형도의 합이 나빠지는 것을 볼 수 있다. Fig. 12 는 Fig. 10 의 1 번에서 Fig. 11 의 5 번까지 굽힘 변형도_1 의 분포가 어떻게 변화했는지를 보여준다. 여기서 선분의 길이는 굽힘 변형도의 크기를 의미한다.

Fig. 12 에서 보이는 바와 같이 실제 분포의 크기도 변화함을 알 수 있는데, 그림에서처럼 가운데 그림에서의 굽힘 변형도는 거의 없음을 볼 수

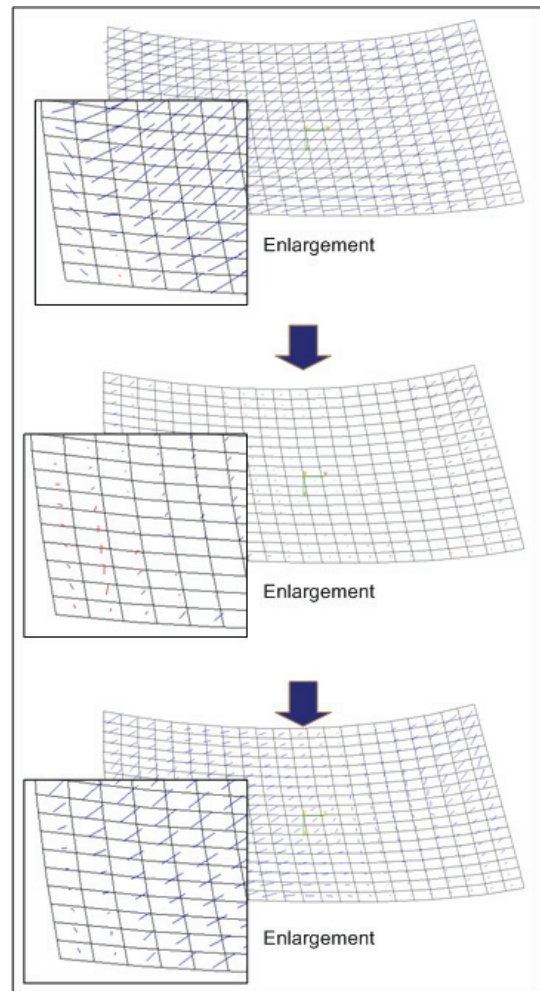


Fig. 12 A change of bending strain distributions

있고, 마지막의 그림에서 다시 굽힘 변형도가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 첫 번째 그림에서처럼 종방향 굽힘 변형도가 컸지만, 4 번의 가열을 통해 두 번째 그림처럼 종방향의 굽힘 변형도가 많이 줄었다. 하지만, 부재를 뒤집어서 횡방향의 곡을 만들기 위해 가공하는 과정에서 다시 마지막 그림에서와 같이 종방향의 곡이 다시 발생하게 된다.

3.2 선수 부재 2번 - 단순 지지

두 번째 실험 부재도 선수부분의 부재를 사용하였고, 목적 형상은 다음의 Fig. 13 과 같다.

앞의 선수 부재 1 번과 같은 방법으로 굽힘 변형도의 변화 추이를 계산하였고, 그 결과를 Fig. 14 와 Fig. 15 에 나타내었다.

Fig. 14 는 종방향의 곡을 목적형상과 맞추기 위해 가공하는 동안의 굽힘 변형도의 변화를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 굽힘 변형도_1 은 줄어드는데 반해 굽힘 변형도_2 는 증가하는 것을 볼 수 있다. 비록 전체적인 굽힘 변형도의 크기는 줄어들지만, 3 회 가공 이후에는 곡펴짐 현상으로 인해서 가공 효율이 떨어지게 됨을 파악할 수 있다. 6 회 가공 후 부재를 뒤집어서 횡방향의 곡을 만들기 위한 가공을 했는데, Fig. 15 와 같이 굽힘 변형도_2 는 줄어들지만, 역시 굽힘 변형도_1 이 증가하는 현상을 확인할 수 있었다. 이 경우에서도 Fig. 11 과 마찬가지로 4 번 이후의 굽힘 변형도의 함이 작아지지 않음을 확인할 수 있었다.

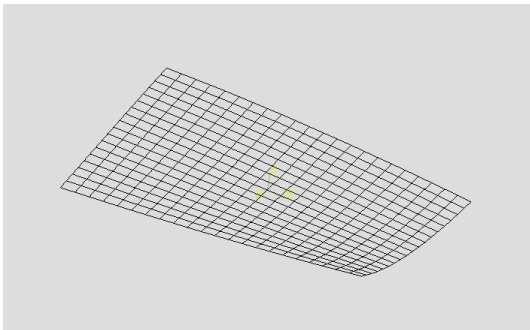


Fig. 13 The designed surface (No. 2)

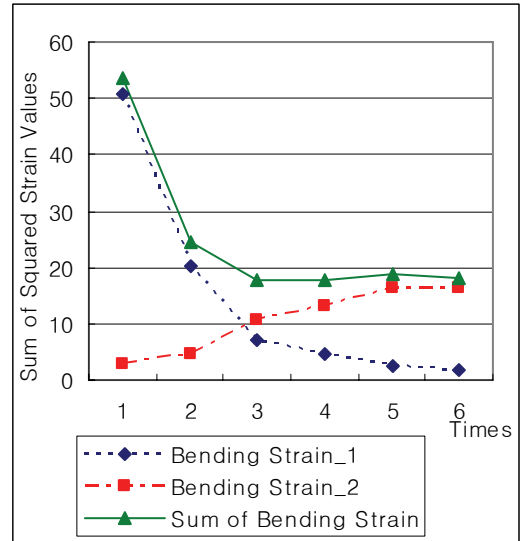


Fig. 14 A change of bending strains by heating on the upper side

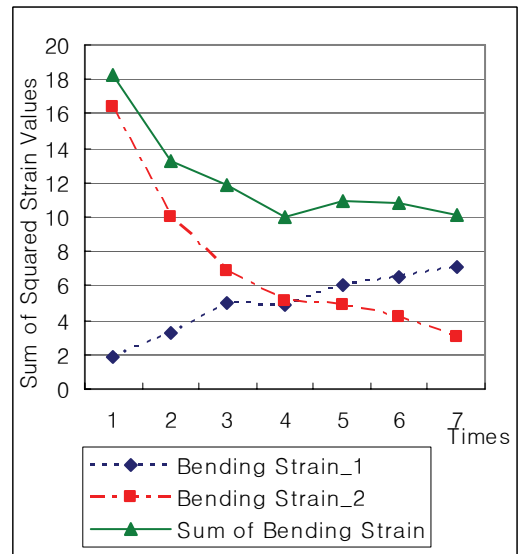


Fig. 15 A change of bending strains by heating on the lower side

3.3 선수 부재 2번 - 강제 변위

마지막으로 2 번 사용되었던 부재에 대해서 강제 변위를 주어 가공하고, 이 때의 굽힘 변형도

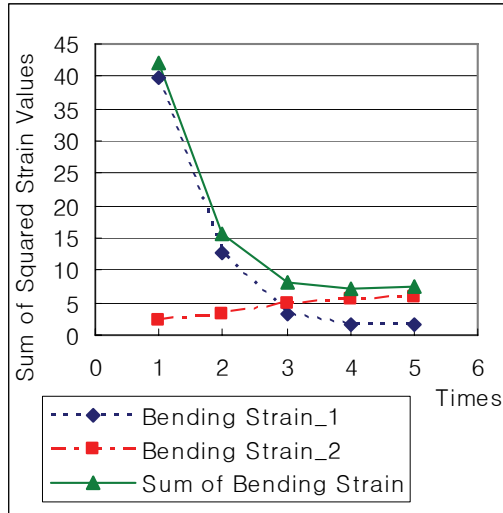


Fig. 16 A change of bending strain by heating on lower side using constraint

변화를 확인하였다.

그 결과 Fig. 16 과 같이 굽힘 변형도_1 이 급격히 줄어드는 반면에, 굽힘 변형도_2 는 앞의 경우에 비해 크게 증가하지 않음을 확인 할 수 있었고, 굽힘 변형도의 합도 안정적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 강제 구속조건이 가공 효율을 향상시킬 뿐만 아니라, 곡퍼짐 현상도 어느 정도 막아주기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 안장형 부재에 대해 선상가열 작업을 할 때 일반적으로 발생하는 현상인 곡 퍼짐 현상에 대해 굽힘 변형도를 이용하여 분석하였고, 이러한 곡 퍼짐은 부재의 최종 완성형상까지 도달하는데 있어서 매우 중요한 요소로 관리되어야 함을 확인할 수 있었다. 즉, 선상가열에서 곡퍼짐 현상은 일반적으로 무시할 만큼 작지 않고, 강제변위와 같은 구속조건을 사용할 경우 그 영향을 어느 정도 감소시킬 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 또한 일반적으로 전체 굽힘 변형

도의 합은 전체적인 완성도를 판단하는데 도움이 되는 한 가지 기준이 될 수 있는데, 이 기준으로 비춰볼 때, 한번 뒤집어서 가공할 경우 초기에는 전체적인 굽힘 변형도를 급격하게 낮추는 효과를 볼 수 있지만, 횡수가 늘어날수록 그 효과가 적어지는 것을 확인할 수 있다. 물론 이러한 효과는 부재의 두께, 가열선의 개수 및 속도와 같이 영향을 고려해 봐야 하지만, 이를 감안하더라도 부재를 뒤집고 나서 많은 횡수를 가공하는 것은 큰 의미가 없다는 사실을 파악할 수 있었다.

이러한 연구를 바탕으로 향후에는 구속조건의 위치나 강제 변위량을 제시하고 이를 반영한 가공 정보 생성이 가능한 방법에 대한 연구가 필요하며, 부재를 뒤집는 시점을 언제로 할지에 대한 명확한 기준을 마련하는 것 또한 향후 연구 과제로 중요하게 다뤄질 필요가 있다.

후 기

본 논문은 산업자원부의 지역산업기술개발과제(10024292-2006-12)과 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R17-2007-072-01000-0)의 일부로 수행된 것을 정리한 것으로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Jang, C.D. and Moon, S.C., 1998, "A New Algorithm to Determine Heating Lines for Plate Forming by Line Heating Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 35, No. 2, pp. 104-113.
- Lee, J.H. and Shin, J.G., 2002, "Relations between Input Parameters and Residual Deformation in Line Heating Process using Finite Element Analysis and Multi-Variate Analysis," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No. 2, pp. 69-80.
- Lee, J.S., Kim, S.I. and Oh, S.J., 1994, "Plate

Forming Automation System of Steel Plates by Line Heating Method(I)", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 4, pp. 139-146.

- Park, J.S., Shin, J.G. and Ko, K.H., 2007a, "Geometric Assessment for Fabrication of Large Hull Pieces in Shipbuilding," Computer-Aided Design, Vol. 39, No. 10, pp. 870-881.
- Park, J.S., Shin, J.G., Ko, K.H., Hyun, C.M. and Doh, Y.C., 2007b, "Development of an Automated Line Heating Information Extract System for Fabrication of Curved Hull Plates," ICCAS2007, Portsmouth, UK.
- Ryu, C.H., 2002, "A Consistent Algorithm for Unfolded Flat Shape of Curved Ship's Hull Shells by Minimizing Strain Energy," Ph.D dissertation of Seoul National University.
- Shin, J.G. and Lee, J.H., 2002 "Nondimensionalized Relationship Between Heating Conditions and Residual Deformations in the Line Heating Process," Journal of Ship Research, Vol. 46, No. 4, pp. 229-238.
- Shin, J.G., Ryu, C.H., Lee, J.H. and Kim, W.D., 2003, "A User-friendly, Advanced Line Heating Automation for Accurate Plate Fabrication," Journal of Ship Production, Vol. 19, No. 1, pp. 8-15.

- Shin, J.G. and Ryu, C.H., 2000, "Nonlinear Kinematic Analysis of the Deformation of Plates for the Ship Hull Fabrication," Journal of Ship Research, Vol. 44, No. 4, pp. 270-277.
- Storch, R.L., Hammon C.P., Bunch H.M. and Moore R.C., 1995, Ship Production 2nd ed., The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey.



< 박 정 서 >



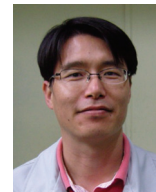
< 김 정 >



< 신 종 계 >



< 현 충 민 >



< 도 영 철 >



< 고 광 희 >