

## 이중 곡률을 가지는 선박용 외판 성형을 위한 점진적 롤 성형 공정의 적용에 관한 실험적 연구

심도식<sup>1</sup> · 정창균<sup>1</sup> · 성대용<sup>1</sup> · 양동열<sup>#</sup> · 한명수<sup>2</sup> · 정성욱<sup>2</sup>

### An Experimental Study on Incremental Roll Forming Process for Manufacturing Doubly Curved Ship Hull Plates

D. S. Shim, C.G. Jung, D. Y. Seong, D. Y. Yang, M. S. Han, S. W. Chung

(Received October 11, 2007)

#### Abstract

In order to manufacture a doubly curved sheet metal, the incremental roll forming process which adopts advantages such as the flexibility of the incremental forming process and continuous bending deformation of the roll forming process has been experimentally investigated. An experimental equipment was developed which was named as unit roll set (URS) consisting of two pairs of support rolls and an upper center roll. The upper roll equipped with the servo control unit is motor-driven and can be positioned in the vertical direction according to the user's commands. Four support rolls are idle, and they freely rotate only along the axis so as to transfer the plate more stably in the tangential direction of the rotation of the driving roll. In the process, the plate is deformed incrementally as deformation proceeds simultaneously in longitudinal and transverse directions. Through the experiments using URS, information regarding to forming schedules is found out to fabricate curved hull plates. This study demonstrates the further application of the incremental roll forming process in shipbuilding industries.

**Key Words** : Incremental Forming Process, Unit Roll Set (URS), Ship Hull Plate, Curvature, Doubly Curved Plates

#### 1. 서 론

선박의 외판(Ship hull)은 단일 혹은 이중 곡률을 가지는 다양한 형상들로 이루어져 있다. 조선 현장에서 이중 곡률을 가지는 외판은 롤 벤딩(cylinder roll bending or press bending) 공정으로 초기 평판을 단일 곡률을 가지는 형상으로 만드는 1 차 가공 과정과 가스 토치(gas flame torch)에 의한 국부적 가열을 이용하는 선상 가열법(Line heating process)을 이용한 2 차 가공 과정을 거쳐 제작된다. 하지만 아직까지도 롤 벤딩과 선상 가열 작업

의 대부분이 작업자의 경험에 의해 이루어지고 있어 생산성이 낮다는 단점을 가지고 있으며, 선상 가열 작업에서는 열원에 의한 고온 및 소음 발생 등에 따른 열악한 작업 환경이 해결되어야 할 문제로 부각되고 있다.

이러한 배경으로 이중 곡률을 가진 판재를 효과적으로 제작하기 위한 다양한 공정들이 제안되었고 아직까지도 꾸준히 연구되고 있다. 이중 곡판 제작을 위한 열간 가공으로, 작업자의 경험에 의존하는 기존의 선상 가열법에 대한 자동화 연구는 국내외에서 활발히 진행되고 있다[1~3]. 선상

1. 한국과학기술원 기계항공시스템학부 대학원

2. (주)대우조선해양

# 교신저자: 한국과학기술원 기계항공시스템학부,

E-mail: dyyang@kaist.ac.kr

가열에 의한 방법은 복잡한 장치가 필요 없이 간단한 시스템으로 후판(thick plate)의 변형을 유도할 수 있다는 장점이 있다. 선상 가열 자동화 공정은 목적 형상의 성형을 위해 결정된 가열 선을 따라 열원(heat source)을 움직이면서 가열과 냉각을 조절하여 판재의 변형량을 제어하게 된다.

이외에도 생산성 향상을 위한 방법으로 열간 가공이 아닌 냉간 가공 공정을 이용한 이중 곡판 제작을 위해, 국내외에서 여러 가지 방법으로 그 연구가 진행되고[4-5] 있으나 다양한 곡률과 크기를 가지는 선박용 후 곡판에 대해서는 아직까지 만족할 만한 정밀도와 생산성을 가지지 못해 실용화 단계는 미치지 못하고 있는 실정이다. 이에 Yoon 과 Yang[6] 등은 점진적 성형 공정(Incremental forming process)의 유연성과 기존 롤 성형 공정(Roll forming process)의 연속적 벤딩 원리를 이용하여 점진적 롤 성형 공정(Incremental roll forming process)을 제안하여 알루미늄 판재를 이용한 이중 곡면 성형에 적용하였다. 이를 좀 더 발전시켜 Shim 과 Yang[7-8] 등은 생산성을 보다 향상시키기 위한 방법으로 롤 셋을 일렬로 상하부에 대칭으로 배열하여 1 회 이송으로 판재의 전 영역에 소성 변형을 유도하는 선형 배열 롤 셋(Line array roll set) 공정을 제안하였다.

본 논문에서는 선박용 판재로 사용되는 연강(mild steel)의 후 곡판 성형을 위해, 앞서 제안된 선형 배열 롤 셋을 구성하는 하나의 단위 롤 셋으로 성형 실험 장치를 개발하였으며 두께 6.5mm 판재를 이용하여 점진적 롤 성형 공정을 선박용 이중 곡판의 제작에 적용하고자 한다. 이에 판재의 길이 방향과 폭 방향으로 이중 곡률을 가진 목적 형상에 대해 곡률 생성 순서에 따른 성형 결과를 확인함으로써 곡률 배분 방안 및 이중 곡판 가공을 위한 우선 방향(preferred direction) 결정에 있어서 참고 데이터로 활용하고 기타 성형 공정 설계에 필요한 정보를 도출하고자 한다.

## 2. 점진적 롤 성형 공정

### 2.1 후곡판용 점진적 롤 성형 장치

Fig. 1은 본 연구에 앞서 개발된 후 곡판용 점진적 롤 성형 장치를 보여주고 있다. Yoon 과 Yang[6]의 실험에 사용된 소규모 실험 장치와는 달리, 새로이 개발된 롤 셋 장치는 비교적 두꺼운 판재를 이용한 FEM 해석을 통해 도출된 성형 하중과 토

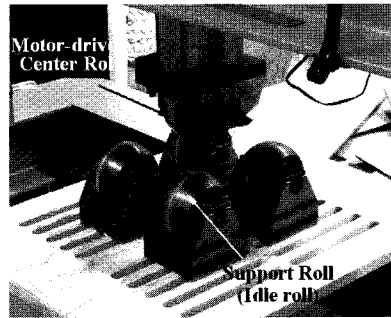
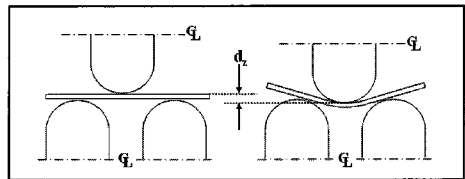
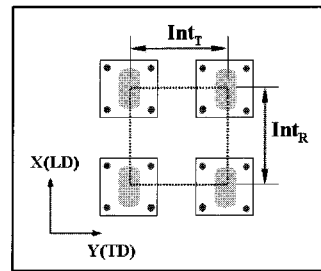


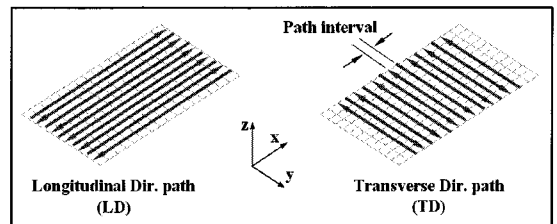
Fig. 1 Experimental setup



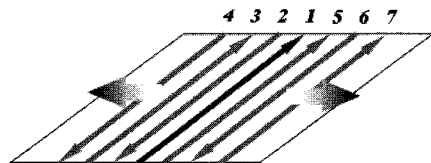
(a) Forming depth



(b) Intervals between support rolls



(c) Forming path (transfer direction of plate)



(d) Forming sequence

Fig. 2 Process parameters

크를 고려하여 제작되었다. 서보 컨트롤 유닛(servo control unit)이 장치된 상부 롤은 모터 구동

에 의해 회전되고 수직 방향으로 사용자의 입력에 따라 높이 조절이 가능하도록 제작되었다. 하부의 받침 롤은 한 방향으로만 자유 회전이 가능하도록 하여 구동 롤 회전의 접선 방향으로 판재를 원활히 이동시킬 수 있도록 하였다.

## 2.2 성형 스텝 및 성형 경로

점진적 성형 원리에 따라 초기 형상을 목적 형상으로 제작하기 위해서는 성형 스텝 별로 성형 깊이(Fig. 2(a)), 받침 롤 간 간격(Fig. 2(b)) 등과 같은 공정 변수 등을 조절하고 Fig. 2(c)와 같이 성형 경로(forming path)를 폭 방향 또는 길이 방향으로 설정하여 목적 형상 성형을 위한 성형 계획을 수립하게 된다. 본 연구에서 각 성형 스텝은 판재의 이송 방향과 성형 깊이 값에 따라 구분하였다. 또한 각 스텝에서의 성형은 Fig. 2(d)에서와 같이 각 경로에 표시된 순서를 따라 진행하게 되는데, 최초 판재의 중심 라인(no.1)을 따라 성형한 뒤 그것을 기준으로, 대칭으로 가장자리 영역을 향하여 성형을 진행시켜 판재 전 영역이 모두 성형이 되면 하나의 스텝이 종료되는 것으로 하여 다단(multi-step) 방식으로 성형 실험을 실시하였다.

## 3. 단일 곡판 성형 실험

### 3.1 선박용 외판의 특징

현재 대형 선박의 선체를 구성하는 외판은 곡면의 형상과 요구되는 곡률의 특징에 따라 평판, 1차 곡면, 2차 곡면 그리고 3차 곡면으로 크게 네 가지로 분류될 수 있다[9]. 본 논문의 연구를 위한

롤 셋을 이용한 성형 실험에서는 Fig. 3과 같이 두 방향으로 이중 곡률을 가진 2차 곡면만을 고려하기로 한다. 2차 곡면에 포함된 선체 외판의 경우, 판재의 폭 방향과 동시에 길이 방향(선수부에서 선미부로 향하는 방향)으로 곡률을 가진 이중 곡면으로서 선체의 선수(bow) 및 선미(stern) 부분을 제외한 대부분의 영역에서 1이 훨씬 넘는 세장비(aspect ratio, 길이 대비 폭)를 가진 직사각의 장방향 곡판으로 이루어져 있다. 여기서 장방향의 금속 판재는 주어진 롤 셋에 길이 방향으로 롤링되어 가공되므로 공정의 롤링 방향(rolling direction)을 판재의 길이 방향(longitudinal direction)으로 정의하는 것으로 한다.

또한 실제 조선소에서 건조되는 선박용 외판의 방향별 곡률을 살펴보면, 일반적으로 폭 방향에 비해 길이 방향으로의 곡률이 극히 작은 수준이며 대부분의 곡판이 1:10 이상의 곡률 종횡비(길이 방향 대 폭 방향 곡률비)를 가지고 있다[4]. 본 연구에서는 Fig. 3(a)와 같은 오목형(concave) 형상에 대해 Fig. 4와 같이 두 가지의 가공 순서에 따른 곡률 생성량을 비교하고자 한다. Fig 4(a)의 case 1은 현재 조선 현장에서 이루어지고 있는 가공 순서와 동일한 방식으로 판재의 횡방향(폭 방향)으로 곡률을 우선 생성시킨 다음, 종방향(길이

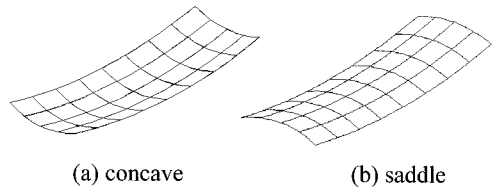


Fig. 3 Second curved surface

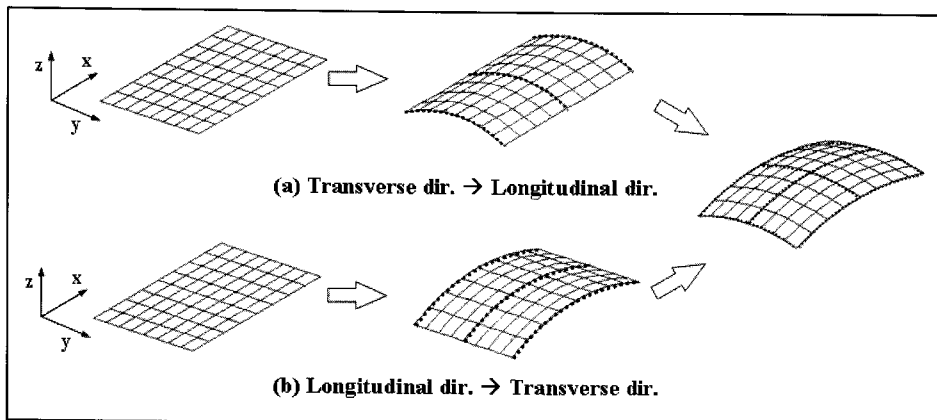
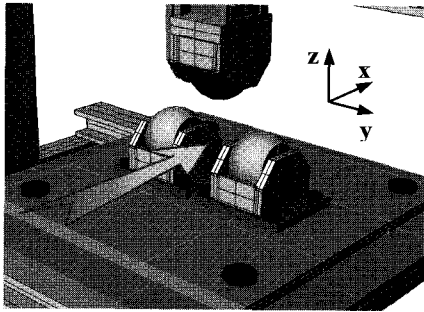
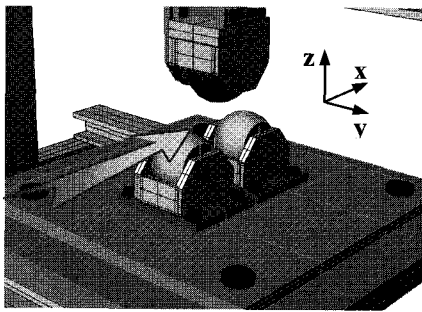


Fig. 4 Forming stages: (a) case 1; (b) case 2



(a) Arrangement for a transverse curvature



(b) Arrangement for a longitudinal curvature

Fig. 5 Two arrangements of the support rolls

방향)의 곡률을 추가하여 최종 오목한 형상의 이중 곡면을 제작하는 가공 방식이다. Case 2 는 Fig. 4(b)와 같이 종방향 가공 후 횡방향의 곡면 가공을 통해 최종 형상으로 성형을 하게 된다.

### 3.2 곡률 생성을 위한 받침롤 배열 형태

두 가지 가공 순서에 따른 실험을 위해, 이중 곡면 성형을 위한 전체 가공 공정을 2 단계로 나누어 각 단계에서 횡방향 또는 종방향의 단일 곡률을 생성시켜 최종 곡면을 성형시키고자 한다. 각 단계에서 단일 곡률을 생성시키기 위한 받침롤의 배열 형태가 Fig. 5에 나타나 있다(화살표 방향으로 판재를 이송).

Fig. 5(a)는 횡곡률(transverse curvature) 성형을 위한 받침롤 배열로서 성형 깊이( $d_r$ )와 경로 간격(path interval)을 조절하여 횡곡률을 생성시킨다. Fig. 5(b)는 종곡률(longitudinal curvature) 생성을 위한 배열로 기존의 롤 벤딩과 유사한 방식으로 곡률을 생성시키게 된다. 따라서 횡방향과 종방향, 두 가지 모두 3 점 굽힘(three point bending)의 원리를 적용하여 점진적으로 판재를 변형시키게 된다.

### 3.2.1 횡방향 단일 곡률 생성(Case 1)

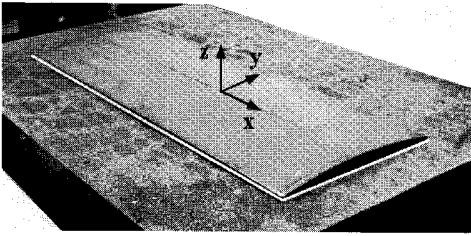
Table 1과 같은 실험 조건으로 장방형의 직사각 평판을 이용하여 횡곡률 생성 실험을 실시하였다. 성형 깊이를 4mm 로 하여 Fig. 2(d)와 같이 5개의 성형 경로를 따라 성형한 결과, 1차 가공된 형상은 Fig. 6(a)와 같다. 성형 결과 생성된 폭방향의 곡률을 Fig. 6(b)와 같이 판재 중심의 폭방향 원호(arc length)를 따라 계산하여 나타내었다. 이후 2차 가공을 통해 종방향 곡률을 추가하여 이중 곡면으로 성형하였으며 그 결과는 다음 장에 비교하였다.

Table 1 Conditions of experiments

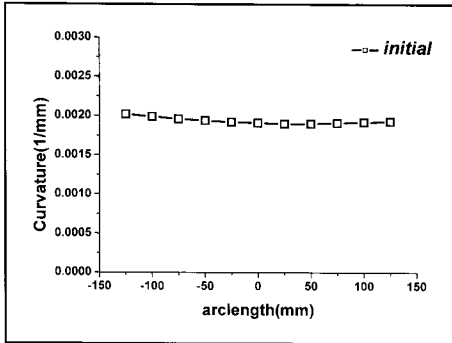
	Value (mm)	
	Initial plate	Material
Length		700
Breadth		250
Thickness		6.5
Radii of rolls	Driving roll	50
	Support roll	50
Path interval	33	
Int <sub>R</sub>	200	
Int <sub>T</sub>	200	
Velocity of transfer	20mm/s	

### 3.2.2 종방향 단일 곡률 생성(Case 2)

횡방향 성형 실험과 동일한 실험 조건으로 장방형의 직사각 평판에 종방향 곡률 생성 실험을 실시하였다. 판재 길이 방향의 중심선에서만 단일 경로를 따라 성형 깊이를 각각 6, 7 그리고 8mm 로 하여 3 가지의 1 차 가공 형상으로 성형하였으며, 각각의 성형 깊이에 따른 생성 곡률 크기를 비교하였다. 성형 깊이 8mm 에 대한 성형 결과를 Fig. 7(a)에 나타내었고, 전체 세 가지 경우에 대해 판재 중심의 길이 방향 원호를 따라 곡률 분포를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 그 결과 상부롤의 압하량 증가에 따라 생성 곡률의 증가를 확인할 수 있었다. 서로 다른 종곡률을 가진 세 가지의 1 차 가공된 형상에 2 차 가공을 통해 동일한 크기의 횡방향 곡률을 추가하여 이중 곡면으로 성형하였으며, 이는 앞 절에서 언급된 횡방향으로의 1 차 가공에 이은 종방향의 2 차 가공을 통해 성형된 최종 형상과 비교 및 검토된다.



(a) Formed shape



(b) Measured curvature along the center line in the transverse direction

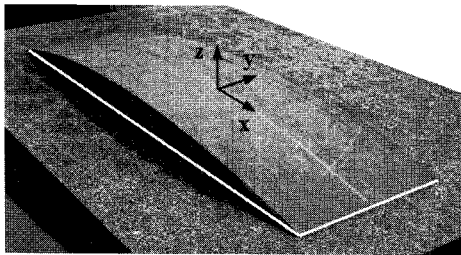
Fig. 6 Results of experiment

#### 4. 성형 순서에 따른 이중 곡판 성형 실험

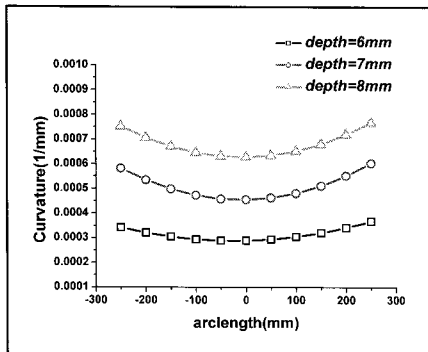
##### 4.1 이중 곡면 성형

##### 4.1.1 종방향 2차 가공(Case 1)

앞서 횡방향으로 1차 가공되어 동일한 단일 곡률을 가지는 3개의 초기 형상에, 앞의 종방향 단일 곡률 실험과 동일한 방식으로 판재 종방향 중심선의 단일 경로를 따라 성형 깊이를 각각 6, 7 그리고 8mm로 하여 3가지의 최종 형상으로 2차 가공을 하여 이중 곡면을 성형하였다. 성형 깊이가 8mm로 2차 가공한 최종 형상을 Fig. 8(a)에 나타내었고, 2차 가공으로 인한 종곡률의 추가 후 이전 단계에서 생성된 횡방향 곡률의 변화를 Fig. 8(b)에서 관찰할 수 있다. 그림에서와 같이 1차 가공에 의해 생성된 횡방향 곡률("initial")은 종방향의 곡률 생성에 의해 감소되었으며, 그 감소량은 추가되는 종방향 곡률이 증가할수록 커짐을 확인할 수 있다. 2차 가공에 의해 이전 단계에서 생성된 곡률 감소 현상이 나타났음에도 불구하고 최종 형상에는 종방향과 횡방향의 곡률에 의해 이중 곡면이 생성됨을 확인할 수 있었다.

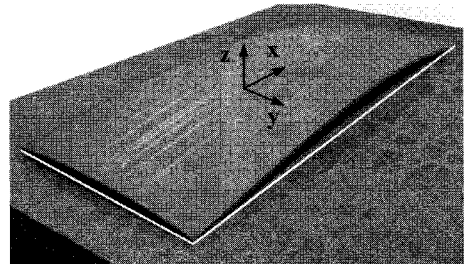


(a) Formed shape

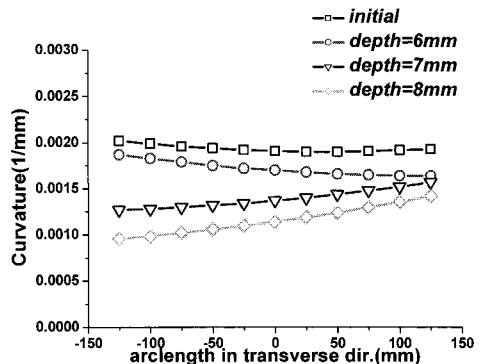


(b) Measured curvature along the center line in the longitudinal direction

Fig. 7 Results of experiment



(a) Formed shape



(b) Transverse curvature of the formed plates

Fig. 8 Results of experiments (case 1)

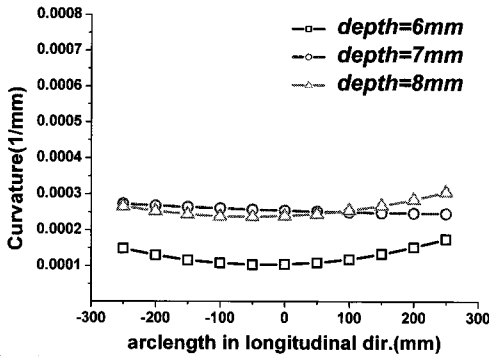


Fig. 9 Results of experiments(case 2): Longitudinal curvature of the formed plates

4.1.2 횡방향 2차 가공(Case 2)

앞서 종방향으로 서로 다른 단일 곡률 크기를 가지도록 성형 깊이를 6, 7 그리고 8mm로 하여 1차 가공된 세 가지 형상에, 각각 앞의 횡방향 단일 곡률 생성 실험과 동일한 방식으로 2차 가공을 하여 동일한 크기의 횡방향 곡률을 추가함으로써 3가지 형태로 이중 곡면을 성형하였다. 앞의 case 1 과 마찬가지로 횡방향의 2차 가공에

의해 이전 단계에서 생성된 종방향 곡률의 전후 비교를 위해 Fig. 9 에 3 가지의 최종 성형 곡면에 대한 종방향 곡률 분포를 나타내었다. 1 차 가공에 의해 생성된 종방향 곡률 분포(Fig. 7(b))와 비교해볼 때, 세 가지 모두의 경우에서 이전 단계에서 생성된 종곡률이 감소되었음을 확인할 수 있었다. 하지만 case 1 에서와 마찬가지로 Fig. 8(a)와 유사한 형상의 이중 곡률을 가진 최종 형상을 얻을 수 있었다.

앞선 두 가지 cases 에서 공통적으로 관찰할 수 있는 현상은 현재의 단계에서 발생하는 곡률에 의해 이전 단계에서 생성된 수직 방향 곡률의 감소 현상이다. 평판을 이중 곡면으로 성형하기 위해서는 굽힘 변형뿐만 아니라 면내 변형(in-plane strain)이 수반되어야 한다. 1 차 가공에 의해 성형된 형상들처럼 단일 곡률을 가지는 1 차 곡면들은 굽힘 변형만으로도 쉽게 성형이 가능하다. 선상 가열을 이용한 이중 곡면 가공의 경우, 주로 가열에 의한 면내 수축(shrinkage) 변형에 의해 이중 곡면이 성형된다. 하지만 냉간 가공(cold fabrication)의 경우, 판재의 영역별로 면내 신장(stretching)과 수축의

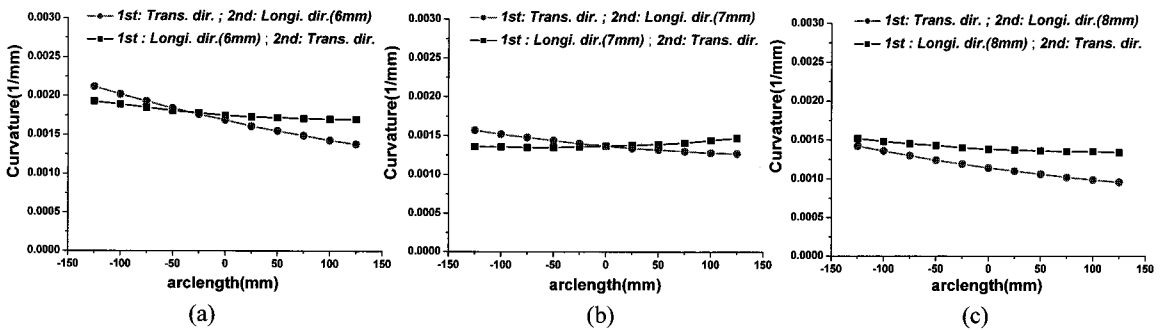


Fig.10 Curvature in the transverse direction

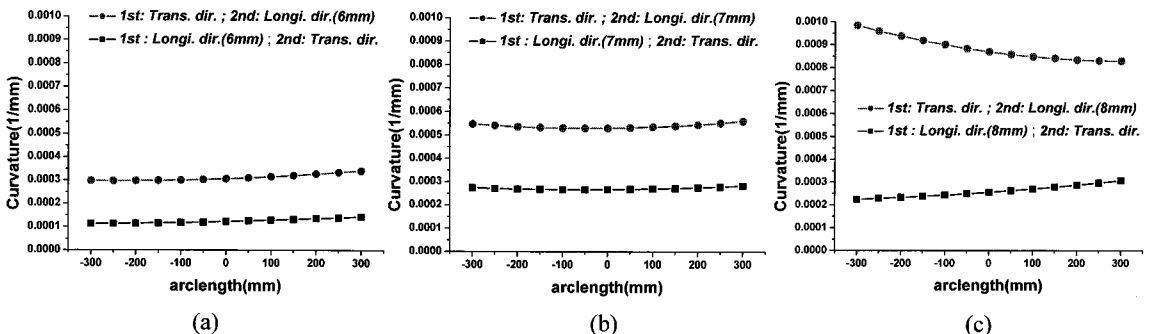


Fig. 11 Curvature in the longitudinal direction

복잡한 변형에 의해 이중 곡률이 생성된다. 따라서 냉간 가공에 의한 이중 곡률 제작 공정에서 과도한 신장에 의한 찢어짐(tearing) 또는 과도한 수축에 의한 주름(wrinkling) 등의 성형 결함이 발생하게 된다. 하지만 급힘 변형을 점진적으로 발생시키는 본 공정의 경우, 단계별 생성 곡률 간의 상호 작용에도 불구하고 곡률 생성을 점진적으로 증가시켜 가면서 면내 방향으로 자연스러운 변형률을 유발시키게 함으로서 특별한 성형 결함 없이 이중 곡면의 제작이 가능함을 알 수 있다. 이는 최종 목적 형상 성형을 위한 성형 계획(forming scheduling)에 있어서 곡률 생성 방향 및 성형 증분에 대한 중요성을 나타내고 있다.

#### 4.2 case 별 생성 곡률 비교

두 가지의 가공 순서에 따른 최종 이중 곡면의 생성 곡률을 비교하기 위해, Fig. 10 과 Fig. 11 에 최종 형상의 중심선을 따라 횡방향과 종방향의 곡률 분포를 각각 나타내었다. Fig. 10 의 횡방향 곡률의 분포에서 알 수 있듯이 가공 순서에 따라 최종 형상의 횡곡률에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이에 반해 Fig. 11 에서와 같이, 선상 가열에 의한 가공 공정 순서와 동일한 순서(case 1)에 의해 성형된 최종 형상은 종곡률에 있어서 반대의 가공 순서에 비해 세 가지 경우에 대해서 모두 50% 이상 크게 나타남을 알 수 있다.

따라서 냉간 성형에 의한 1, 2 차 가공을 통해 최종 형상을 성형하는데 있어서, 위의 실험과 같이 case 1 의 가공 순서에 의한 경우, 2 차 가공에 의한 종곡률의 생성량이 크지 않는 이상, 횡곡률과 종곡률을 동시에 확보할 수 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급했던 바와 같이, 선수와 선미부를 제외한 실제 대형 선박용 외판의 이중 곡면이 대부분 횡곡률에 비해 종곡률의 크기가 상대적으로 극히 작은 형상들로 이루어져 있다는 것을 감안한다면, case 1 의 적용에 따른 효과는 더욱 크다고 할 수 있다.

### 5. 결 론

선형 배열 롤 셋(Line array roll set)의 일부를 구성하는 단위 롤 셋을 설계 및 제작하여 선박용 외판의 이중 곡면 제작을 위한 기초 연구를 수행하였다. 실제 선박용 강판으로 사용되는 연강을 이용한 이중 곡면 성형 실험을 병행하여 최종 목적

형상로의 가공을 2 단계로 나누어 가공 순서에 따라 2 가지 경우에 대한 실험을 실시하였다. 그로부터 다음과 같은 결론을 얻었다

(1) 한 쌍의 받침롤을 롤 회전 방향과 그와 수직인 방향으로 배열하여 각각 종방향과 횡방향으로 단일 곡률을 가지는 1 차 가공 형상을 성형할 수 있었다.

(2) 종방향 또는 횡방향으로 1 차 가공된 형상에 각각의 수직 방향으로 곡률을 추가함으로써 두 방향으로 곡률을 동시에 가지는 이중 곡면을 아무런 결함 없이 성형할 수 있었다.

(3) 점진적 성형 원리를 적용하여 판재에 연속적인 급힘 변형을 생성시켜 가게 되면 이중 곡면 성형에 필요한 면내 변형률 또한 점진적으로 수반되어 부드러운 이중 곡면이 생성됨을 확인할 수 있었다.

(4) 가공 순서에 따른 최종 성형 곡면의 성형 결과를 비교하기 위해 두 가지 경우에 대해 실험을 실시한 결과, 실제 선박용 외판의 곡률 종횡비를 감안할 때 횡방향에 이은 종방향으로의 2 차 가공이 진행될 때 좀 더 효율적으로 최종 곡면을 성형할 수 있을 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 경상남도 지역산업 중점기술개발 사업인 “장방형 대형 후곡판용 점진적 롤 성형 시스템 개발”의 일부이며 이에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] T. Nomoto, T. Ohmori, T. Sutoh, M. Enosawa, K. Aoyama, M. Saitoh, 1991, Development of Simulator for Plate by Line Heating, J. Soc. Nav. Arch. Japan, Vol. 170, pp. 577~586.
- [2] Y. Ueda, H. Murakawa, A. M. Rashwan, R. Kamichika, M. Ishiyama, J. Ogawa, 1993, Development of Computer Aided Process for Plate Bending by Line-heating(4th Report) Decision Making on Heating Condition, Location and Direction, J. Soc. Nav. Arch. Japan, Vol. 174, pp. 683~695.
- [3] J. G. Shin, W. D. Kim, J. H. Lee, 1996, Numerical Modeling for Systematization of Line Heating Process, J. Hydrospace Tech., Vol. 2 No. 1, pp.

- 41~54.
- [4] F. Nishioka, M. Matsuishi, W. Yasukawa, O. Tohgoh, K. Nishimaki, T. Tanaka, T. Yamauki, 1978, On Automatic Bending of Plates by the Universal Press with Multiple Piston heads(1st Report : Fundamental Study), Trans. Soc. Nav. Arch. Japan, Vol. 132, pp. 481~501.
- [5] E. H. Rady, 1992, Mechanics of Die-less Forming of Doubly Curved Metal Shells, Ph. D. Thesis, Dept. of Ocean Engineering, M.I.T., Cambridge.
- [6] S. J. Yoon, D. Y. Yang, 2005, An Incremental Roll Forming Process for Manufacturing Doubly Curved Sheet Blanks with Enhanced Process Features, Annals of CIRP, Vol. 1, pp. 221~224.
- [7] D. S. Shim, C. G. Jung, D. Y. Seong, D. Y. Yang, Y. S. Han, M. S. Han, 2006, A Study on the Line Array Roll Set Process for the Cold Fabrication of a Doubly Curved Metal Plate, KSTP, Oct., pp. 292~295.
- [8] D. S. Shim, C.G. Jung, D. Y. Seong, D. Y. Yang, J. M. Han, M. S. Han, 2007, Process Development And Simulation For Cold Fabrication Of Doubly Curved Metal Plate By Using Line Array Roll Set, Numiform2007, June 17-21, Portugal, pp. 865~870.
- [9] S. Y. Kim, B. Y. Moon, D. E. Kim, S. C. Shin, 2006, Automation of Hull Plates Classification in Ship Design System using Neural Network Method, Mech. Sys. & Sig. Proc. Vol. 20, pp. 493~504.