

## 선체 곡판의 롤 굽힘 공정 변수 결정을 위한 가공 형상의 최적 근사 알고리즘

유철호<sup>†\*</sup>, 이장현\*, 윤종성\*

인하대학교 공과대학 선박해양공학과\*

### An Algorithm on Determination of Process Parameters for Roller Bending of Curved Shell Plates

Cheolho Ryu<sup>†\*</sup>, Jang Hyun Lee\* and Jong Sung Yoon\*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University\*

#### Abstract

This paper presents how to approximate an optimal shape of roll bending process in the fabrication of a curved shell plate. The roll bending process usually makes the cylindrical or conic shape from an initial flat plate. It means that the final shape is developable or its surface representation has zero Gaussian curvature. The fabrication shape is important in order to find process parameters of roll bending. An optimal concept is used to determine the developable fabrication shape which is in the closest proximity to the design surface or the given shell plate and is subject to developability. The results and the efficiency of this algorithm are evaluated by applying to some shell plates. Furthermore, the fabrication shape will be fundamental information for other process parameters of roll bending such as the vertical displacement of the center roller and the rolling directions.

※Keywords: Singly/doubly curved shell plate(단순/이중 곡판), Developable surface(전개 가능 곡면), Roll bending process(롤 굽힘 가공), Differential evolution (차별적 진화 방법)

#### 1. 서론

선박의 선수미부는 복잡한 곡을 가진 곡판들이 조립되어 만들어 진다. 인장(Stretch)이나

수축(Shrinkage) 없이 전개가 가능한 단순 곡면(Singly curved surface)과 인장이나 수축 없이 전개가 불가능한 이중 곡면(Doubly curved surface)이 포함된다. 그러나 선수미부에 분포한 곡판들은 대부분 전개가 불가능한 곡면(Nondevelopable surface)으로, 이러한 복잡한 곡을 분포를 가진 곡면을 가공하기 위해서

접수일: 2007년 7월 6일, 승인일: 2007년 8월 21일

†교신저자: cheolho\_ryu@inha.ac.kr, 032-860-8486

롤 굽힘 가공과 선상 가열과 같은 가공법이 널리 사용되어 왔다.

실린더 형상이나 원추 형상 같은 단순 곡면의 선체 곡판인 경우 롤 굽힘 가공이나 프레스 가공으로 목적 곡면(설계 곡면, Design surface)이 얻어질 수 있고 그 외 이중 곡면의 선체 곡판은 선상 가열이나 삼각가열과 같은 열간 가공에 의한 이차 가공이 수행되어 목적 곡면을 얻는다. 그러나 고가의 롤 굽힘 장비나 프레스 장비를 갖추지 못한 경우 열간 가공만으로 목적 곡면을 만들기도 한다.

곡면 가공 공정은 많은 공수를 필요로 하며 높은 정밀도를 요구하는 분야로 생산성 향상과 작업 환경의 개선 측면에서 자동화가 요구되어 왔다. 롤 굽힘 작업은 곡면 가공 공정의 한 부분을 차지하고 있는 만큼 가공 자동화를 위해서는 이 공정에 관한 연구도 필수적으로 인식되었다(김유일 등 1996, 박태준 등 1996, 윤대규 등 1999, Shin et al. 2002). 특히 이중 곡면의 가공에서 롤 굽힘에 의한 일차 가공이 선행되며 후속 공정인 선상 가열의 작업량과 작업성이 결정되므로 일차 가공이 쉽게 수행될 수 있고 선상 가열 작업을 줄일 수 있는 일차 가공 정보가 결정되어야 한다.

곡판의 가공 공정에 관한 연구 중 롤 굽힘 가공과 같은 일차 가공은 국내 연구자들에 의한 연구 외에는 그 사례를 찾기가 어려웠다. 김유일 등(1996)은 피라미드 형의 롤러에 의한 굽힘을 수치해석을 통해서 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 목적 곡면의 곡률에 따라서 요구되는 중앙 롤러의 변위를 결정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 박태준 등(1996)은 목적 곡면의 곡률 분포와 그 통계적 처리를 통해 롤 굽힘의 영역을 결정하였다.

Randrup(1998)은 임의 곡면을 실린더 곡면으로 근사시키는 알고리즘을 제시하였다. 이것은 임의 곡면을 전개 가능한 곡면들의 조각(patch)들로 근사시키는 다른 방법들과(Pottmann and Farin 1995, Pottmann and Wallner 1999) 달리 하나의 전개 가능한 곡면을 결정할 수 있다는 점에서

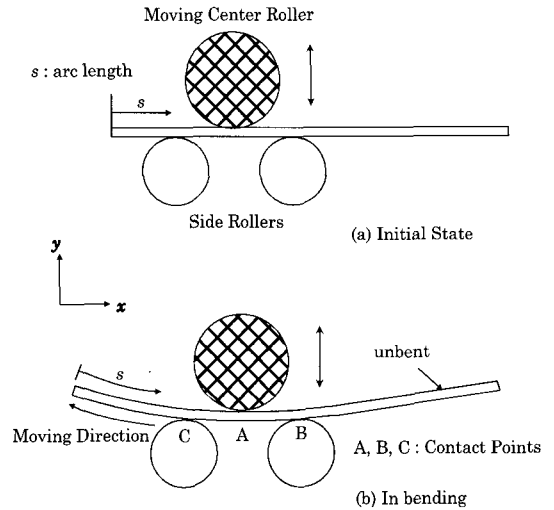


Fig. 1 Bending process by pyramid type rollers (modified from [1])

일차 가공을 위한 정보 생성에 적절한 방법을 제시할 수 있다. 그러나 이 연구는 실린더의 형상을 계산할 때 화상 처리(Image processing) 기법을 이용하여 목적 곡면의 특성을 고려하지 못한 점이 있다. Shin et al.(2002)은 롤 굽힘 가공에서 공정 변수들을 제시하였고 그 결과로 각 공정 변수들을 산출하기 위한 통합 프로그램의 사례를 찾아볼 수 있다.

본 논문에서는 선체 곡판의 롤 굽힘 가공에서 공정 변수들을 고찰하고 전역 최적화 알고리즘인 Differential Evolution(DE, 차별적 진화 방법)을 이용하여 목적 형상을 다항식으로 표현되는 전개 가능한 곡면으로 근사하고 각 공정 변수들의 산출에 활용 방안을 제시한다. 그리고 국내 조선소로부터 제공 받은 컨테이너선의 선체 곡판에 대해 제시한 알고리즘을 적용하여 그 타당성을 검증한다.

## 2. 롤 굽힘 가공

곡면은 곡률의 특성에 따라서 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 수학적으로, 임의 곡면에 대한 가우스 곡률(Gaussian curvature)의 분포가 영(Zero)이면 전개 가능한 곡면(Developable

surface), 그리고 영이 아니면(Nonzero) 전개가 불가능한 곡면(Nondevelopable surface)이라 한다. 역학적으로, 전개 가능한 곡면은 인장이나 수축의 변형 없이 단순 굽힘만으로 제작이 가능하고, 전개 불가능한 곡면은 그렇지 못하다. 각각의 곡면을 단순 곡면, 이중 곡면이라 부른다. 단순 곡면은 일반 조선소에서 사용하는 피라미드형의 롤 굽힘 장치에 의해 가공이 가능하다. 하지만 이중 곡면은 이 굽힘 가공만으로 만들어지지 않으므로 선상 가열이나 기계적 가공과 같은 인장 및 수축을 발생할 수 있는 후속 작업이 필요하다.

이 두 가지 경우 모두 롤러에 의한 굽힘 가공이 필요하다. 단순 곡면을 제작하는 경우에 굽힘 가공만으로 원하는 형상을 제작할 수 있고, 이중 곡면을 제작하는 경우에 후속 작업의 편의성을 위해 선형 작업으로 롤 굽힘 작업이 수행되어 일단 단순 곡면을 제작하게 된다. Fig. 1은 피라미드형의 롤 굽힘 장치에 의해 가공되는 모델을 보여 주고 있다. 아래 두 개의 롤러(Side roller, 2, 3)는 상하 위치가 고정되고 좌우 위치를 조절할 수 있도록 되어 있고 중앙 롤러가 상하로 움직이며 대상 철판을 누르게 된다.

이 때 가공되는 형상은 중앙 롤러를 누르는 위치(방향, Roll Line)와 누르는 양(상하 변위)  $h_i$ , 2 개의 측면 롤러의 거리  $b_i$ 에 의해 결정된다. 즉 이들이 롤러에 의한 굽힘 가공의 공정 변수들이 된다. 롤라인은 본 논문에서 제시하는 전개 가능 곡면이나 목적 곡면의 곡률 분포 등으로 얻어질 수 있으나  $h_i$ 와  $b_i$ 는 역학적인 관점에서 상관 관계를 가지고 있기 때문에 쉽게 얻어질 수 없다. 그러나  $h_i$ 와  $b_i$ 를 유도하는 과정에서도 롤 굽힘 가공 후 형상은 필수적으로 요구된다(Hardt et al. 1992, 김유일 등 1996).

### 3. 전역 최적화를 통한 전개 가능 곡면의 근사

롤 굽힘 가공에 의해 만들어지는 형상은 전개가능 곡면에 속한다. 임의 곡면에 대한 가우스 곡률의 분포가 영(zero)인 전개 가능한

곡면은 주어진 목적 형상의 최적 근사를 통해 얻어진다. 즉 목적 형상에 가까운 전개 가능 곡면이 롤 굽힘 가공에 의해 만들어지는 형상이고 선체 외판의 종곡을 만들기 위한 선상 가열과 같은 후속 공정의 생산성 및 가공성을 향상시켜줄 것으로 추측할 수 있다. 물론 이것은 실제 검증이 필요한 사항이며 계속 연구를 통해 검증할 계획이다.

본 논문에서는 전개 가능 곡면을 영(0)인 가우스 곡률을 갖는 Polynomial 곡면으로 정의하며, 목적 형상에 최적 근사가 되도록 각 계수가 구해진다. 본 장에서 Polynomial 곡면의 일반적인 표현을 간단히 살펴보고 설계 변수(Design Variable)를 설정하며, 설계 변수에 대한 목적함수와 제약 조건을 제시한다. 그리고 전역 최적화 알고리즘으로 사용된 차별적 진화 방법(Differential Evolution, DE)이 기술된다.

#### 3.1 설계 변수: Polynomial 곡면

$x, y$ 에 대한 차수가 각각  $n$ 이고 각 항의 계수를  $a_{ij}$ 라고 하면 Polynomial 곡면  $z = D(x, y)$ 는 일반적으로 식(1)과 같이 표현된다.

$$z = D(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i a_{ij} x^{i-j} y^j \quad (1)$$

차수  $n$ 이 2, 3, 4인 Polynomial 곡면을 자세하게 기술하면 다음과 같다. 여기서부터는 표기와 계산의 편의성을 위해 각 계수를  $a_i$ 로 한다.

$$\begin{aligned} n=2 \text{인 경우} \\ z = D(x, y) \\ = a_1 x^2 + a_2 xy + a_3 y^2 + a_4 x + a_5 y + a_6 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} n=3 \text{인 경우} \\ z = D(x, y) \\ = a_1 x^3 + a_2 x^2 y + a_3 xy^2 + a_4 y^3 + \\ a_5 x^2 + a_6 xy + a_7 y^2 + a_8 x + a_9 y + a_{10} \end{aligned} \quad (3)$$

$$n=4 \text{인 경우}$$

$$\begin{aligned}
 z &= D(x, y) \\
 &= a_1x^4 + a_2x^3y + a_3x^2y^2 + a_4xy^3 + a_5y^4 \\
 &\quad a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 + \\
 &\quad a_{10}x^2 + a_{11}xy + a_{12}y^2 + a_{13}x + a_{14}y + a_{15}
 \end{aligned} \tag{4}$$

본 논문에서는 이 세 가지 곡면으로 전개 가능 곡면을 근사하여 최적화 문제의 성능을 비교 검토하고 이를 통해 타당한 차수를 판단하도록 한다. 식 (2)~(4)에서 각 경우에 대해서 각 항의 계수  $a_i$ 가 전역 최적화를 위한 설계 변수가 된다.

Polynomial 곡면은 음함수 또는 매개변수로 정의된 곡면의 곡률 식으로부터 아래와 같이 간단한 식으로 유도된다(Goldman 2005).

양함수로 표현된 곡면  $z = D(x, y)$ 를 다음과 같이 음함수로 정의함으로써 곡률을 검토할 수 있다.

$$F(x, y, z) = z - D(x, y) = 0 \tag{5}$$

본 논문에서는 가우스 곡률(Gaussian curvature)  $\kappa_G$ 만을 고려하기로 한다. 식(5)로 정의된 곡면에 대한 가우스 곡률의 계산을 위해 목적 곡면 함수  $F$ 의 그래디언트(gradient)  $\nabla F$ 와 헤시안 행렬(Hessian Matrix)  $\mathbf{H}(F)$ 가 필요하다.

$$\mathbf{H}(F) = \begin{pmatrix} -\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2 D}{\partial x \partial y} & 0 \\ -\frac{\partial^2 D}{\partial y \partial x} & -\frac{\partial^2 D}{\partial y^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$\nabla F = \left( -\frac{\partial D}{\partial x}, -\frac{\partial D}{\partial y}, 1 \right) \tag{7}$$

그리고  $\mathbf{H}(F)$ 의 수반행렬 (Adjoint matrix)  $\mathbf{H}^*(F)$ 는 식(8)과 같다.

$$\mathbf{H}^*(F) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Det}(\mathbf{H}(F)) \end{pmatrix} \tag{8}$$

여기서  $\text{Det}(\mathbf{H}(F))$ 는 헤시안 행렬  $\mathbf{H}(F)$ 의 행렬식 (Determinant)이다.

가우스 곡률  $\kappa_G$ 는  $\nabla F$ ,  $\mathbf{H}(F)$ ,  $\text{Det}(\mathbf{H}(F))$ 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa_G = \frac{\nabla F * \mathbf{H}(F) * \nabla F^T}{|\nabla F|^4} = \frac{\text{Det}(\mathbf{H}(F))}{(|\nabla F|^2 + 1)^2} \tag{9}$$

### 3.2 목적 함수

본 논문에서는 주어진 대형 선체 곡판에 가장 근사한 전개 가능 곡면을 찾는 방법을 제시한다. 목적 곡면 위의 점  $\mathbf{r}_i$ 가 주어지고 구하고자 하는 전개 가능 곡면 위에 있는 점  $\mathbf{r}_i^*$ 를  $\mathbf{r}_i$ 의 대응점이라고 하면, 최소제곱법(Least square principle)을 기반으로 목적 함수  $f$ 는 두 점  $\mathbf{r}_i$ 과  $\mathbf{r}_i^*$ 사이 거리  $f_i$ 의 제곱의 합으로 정의될 수 있다.

$$f_i = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_i^*) \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_i^*) \tag{10}$$

$$f = \sum_{i=1}^m f_i \tag{11}$$

여기서  $m$ 은 주어진 점의 개수이다.

최적해를 찾는 과정에서 전개 가능 곡면  $F$ 는 반복계산 단계마다 달라지기 때문에 식(10)에서 대응점  $\mathbf{r}_i^*$ 은 매 단계의 전개 가능 곡면에서 주어진 목적 곡면 상의 점  $\mathbf{r}_i$ 의 최근접점(Closest point)으로 얻어질 수 있다.

### 3.3 제약 조건

앞서 언급했듯이 전개 가능 곡면은 전 영역에서 가우스 곡률  $\kappa_G$ 이 영(Zero)인 특성을 가지고 있다. 식(9)로부터 전개 가능 곡면  $F$  상의 점  $\mathbf{r}_i^*$ 에서 가우스 곡률을  $\kappa_G^i$ 라 하면 각 점에서의 가우스 곡률의 합이 매우 작은 값을 가지도록 제약 조건을 부여하여 제약 조건의 개수를 줄이도록 한다.

$$\sum_{i=1}^m |\kappa_G^i| < \varepsilon \tag{12}$$

여기서  $\varepsilon$ 은 가우스 곡률의 분포가 영(Zero)임을 나타낼 수 있도록 작은 값을 취한다.

3.4 차별적 진화 방법 (Differential Evolution)

주어진 선체 곡판의 목적 곡면으로부터 롤 굽힘 가공을 위한 전개 가능 곡면의 최적 근사에 관한 문제를 제약 조건을 가진 최적화 문제로 정식화하였다. 본 절에서는 본 논문에서 사용되는 전역 최적화 기법 중 하나인 차별적 진화 방법(Differential evolution, DE)을 간략히 기술한다. 주어진 문제와 같이 제약 조건을 가진 최적화 문제는 Sequential Quadratic Programming(SQP) 등의 Gradient 기반의 최적화 기법을 사용함으로써 빠른 수렴성을 보여줄 수 있지만 해의 초기값에 따라 지역해(Local optimum)로 빠지는 경향이 많았다. 따라서 본 논문에서는 전역 최적화 기법을 사용하였다.

Storn and Price(1995)에 의하면 DE 는 비선형 목적 함수들을 갖거나 다양한 종속성, 시간적인 제한들을 갖는 복잡한 구조를 가진 실질적인 계획 문제에 적합한 기법이라고 한다. Storn and Price(1995)는 그들의 연구에서 DE 가 연속적인 문제변수들을 갖는 문제들에서는 전통적인 GA 보다 더 효율적이고 효과적이며 강건한 성능을 보임을 증명했다.

DE 에서 모집단(Population)은 목적 함수의 설계 변수의 개수와 동일한 차원 (D) 을 가진 벡터로 구성된다. 각 세대(Generation) G 는 NP 개의 개체(Individual)  $\mathbf{x}_i(i = 0,1,\dots, NP-1)$  를 포함하는 모집단을 가진다.

첫번째 세대는 설계 변수의 허용 범위 내에서 값을 가지도록 난수(Random number)로 초기화되며, 진화가 진행되는 동안 각 세대는 돌연변이 생성(Mutation), 교배(Crossover), 선택(Selection)의 과정을 통해서 나타난다.

각 세대에서 돌연변이  $\mathbf{v}_i$  는 한 개체  $\mathbf{x}_{r_1}$  에 다른 두 개체  $\mathbf{x}_{r_2}, \mathbf{x}_{r_3}$  의 차와 가중치 (Scale factor 또는 Weight) SF 의 곱을 더함으로써 발현된다.

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{r_1} + SF \cdot (\mathbf{x}_{r_2} - \mathbf{x}_{r_3}) \quad (13)$$

여기서  $r_1, r_2, r_3$  는  $0 \sim NP-1$  사이에서 임의로 선택된 정수이며, 서로 다른 값을 갖고 현재

돌연변이를 생성하고 있는 개체의 인덱스 i 와 달라야 한다.

교배는 다음 식과 같이 임시 개체  $\mathbf{u}_i$  의 계산을 통해서 이루어 진다.

$$\mathbf{u}_{i,j} = \begin{cases} \mathbf{v}_{i,j} & \text{if } rand_j \leq CR \text{ or } j = k \\ \mathbf{x}_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{u}_{i,j}$ ,  $\mathbf{v}_{i,j}$ ,  $\mathbf{x}_{i,j}$  는 각각  $\mathbf{u}_i$ ,  $\mathbf{v}_i$ ,  $\mathbf{x}_i$  의 성분이고  $i = 0 \sim NP-1$ ,  $j = 0 \sim D-1$  이다. 그리고 k 는  $0 \sim D-1$  사이의 임의의 정수이고 각 개체의 교배 시에 한번 지정된다. CR 은 교배율(Crossover constant)로 0~1 사이의 값을 가진다.

교배를 통해 나온 임시 개체  $\mathbf{u}_i$  는  $\mathbf{x}_i$  와 목적 함수 값의 비교를 통해서  $\mathbf{x}_i$  보다 작은 값을 주면  $\mathbf{u}_i$  가  $\mathbf{x}_i$  대신에 선택된다. 모집단의 모든 개체에 대해 돌연변이 생성, 교배, 선택의 과정을 거치게 되면 그 결과가 다음 세대로 전달된다.

DE 알고리즘에서 볼 수 있듯이 DE 는 개체 수 NP, 가중치 SF, 교배율 CR 의 제어 변수를 갖는다. 이 변수들이 어떤 값을 갖느냐가 DE 의 성능에 영향을 끼치기 때문에 적절한 값을 가지도록 많은 테스트가 필요하다. Storn and Price(1995)와 Storn(1996)은 제어 변수들의 선정에 관한 의견을 제시하고 있다.

본 논문에서는 여러 번의 시행착오를 거치며, SF = 0.7, CR = 1.0 를 가지는 것이 좋은 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 개체 수 NP 는 설계 변수의 차원, 즉 개수와 관련이 있기 때문에 4 장에서 계산 사례와 함께 각 전개 가능 곡면의 차수에 따라서 제시하기로 한다.

DE 에서 제약 조건을 다루기 위해 벌칙 함수법(Penalty function method)을 사용한다. 이 기법은 제약 조건을 가진 문제를 비제약 조건 문제로 변환시키기 위해 진화 알고리즘에서 자주 사용된다. 벌칙 함수법은 DE 의 선택(Selection) 과정에서 다루어 지는데 교배를 통해 나온 임시 개체  $\mathbf{u}_i$  가 제약조건을 위반하게 되면  $\mathbf{u}_i$  의 목적 함수 값에 매우 큰 값을 입력함으로써  $\mathbf{u}_i$  가

선택되지 않도록 하면 개체  $x_i$  가 다음 세대로 다시 전달되도록 할 수 있다.

4. 적용 사례 및 결과 토의

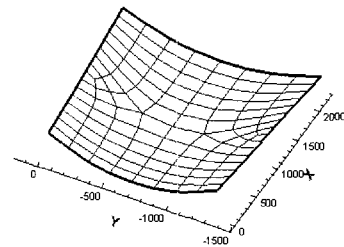
4.1 Polynomial 곡면의 검증 및 차수 결정

본 절에서는 Polynomial 곡면으로 근사한 전개 가능 곡면의 차수가 형상에 끼치는 영향을 살펴보기로 한다. 본 논문에서는 3 장에서 제시된 차수가 2 차, 3 차, 4 차인 Polynomial 곡면을 대상으로 하며, 몇 가지 모델에 대해 각 차수 별로 전개 가능 곡면을 획득하고 계산 성능과 결과를 검토하여 적절한 차수를 제안하도록 한다. 먼저 각 차수에서의 DE 제어 변수(Control parameters)가 Table 1 에 기술된다. 테스트를 수행한 시스템 사양은 Intel Core2 2.4GHz, 메모리 2GB 이다.

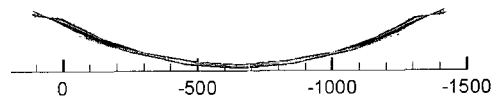
제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 단순 곡면(singly curved shell plate)에 대해 적용하였다. 단순 목적 곡면에 대해서는 계산된 전개 가능 곡면과 형상 오차가 작아야 한다. 조선소로부터 확보한 컨테이너선의 외판 중에서 정확히 전개 가능한, 즉 단순 곡면을 가진 선체 외판을 찾기 어려웠다. 따라서 실린더형이나 원추형에 가장 가까운 2 개의 모델을 선정하여 검토하였다. Fig. 2 과 Fig. 3 는 (Model 1)과 (Model 2)에 대한 설계 곡면과 차수별 전개 가능 근사 곡면을 보여 주고 있다. Table 2 로부터 계산

시간과 절점들에 대한 평균 형상 오차를 확인할 수 있는데 근사 Polynomial 곡면이 전개 가능 곡면으로서 목적하는 설계 형상에 잘 부합함을 알 수 있다.

Fig. 2b, Fig. 3b 는 각 모델에서 차수에 근사 Polynomial 곡면을 함께 보여 주고 있는데 각 차수별로 큰 차이를 보여주고 있지 않지만 이것은 Polynomial 의 차수가 고차로 갈수록 목적 형상으로 근사해 가고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 원추형 형상을 잘 표현할 수 있음을 의미한다.

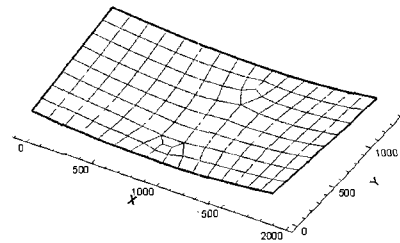


(a) Design Surface

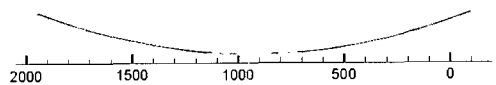


(b) Approximated developable surface

Fig. 2 Design surface and approximated developable surface for Model 1



(a) Design Surface



(b) Approximated developable surface

Fig. 3 Design surface and approximated developable surface for Model 2

Table 1 Control parameters in DE

Order	ND	SF	CR	NP
2	6	0.7	1	150
3	10	0.7	1	300
4	15	0.7	1	350

Order: Order of polynomial surface

ND: Number of design variables

SF: Scale factor or weight in DE

CR: Crossover constant in DE

NP: Number of populations in DE

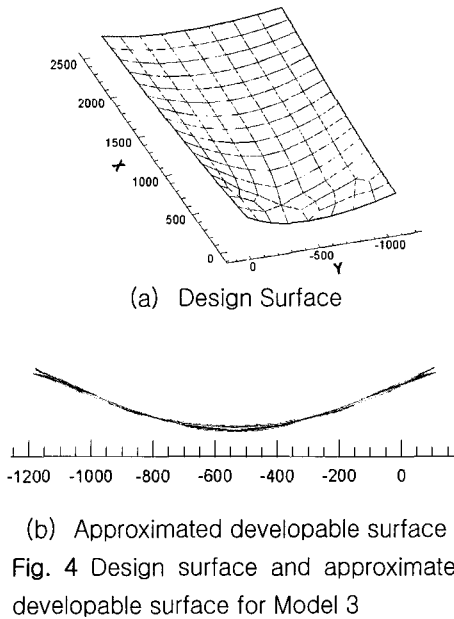


Fig. 4 Design surface and approximated developable surface for Model 3

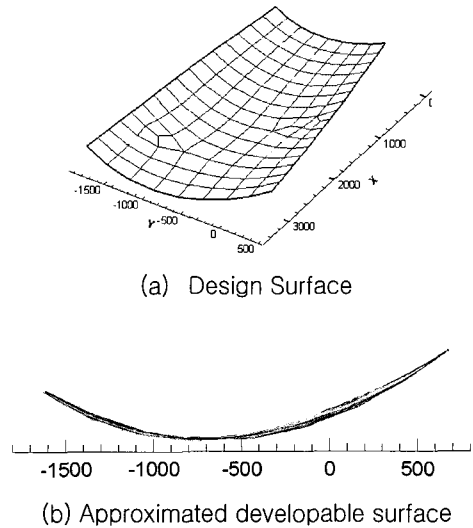


Fig. 5 Design surface and approximated developable surface for Model 4

Table 2 Test cases for singly curved shell plates

	Order	Model 1	Model 2
CPU Times (sec)	2	0.73	0.93
	3	5.09	6.39
	4	19.34	13.84
Mean Errors (mm)	2	4.42	1.60
	3	3.29	1.51
	4	1.78	0.31

Table 3 Test cases for general curved shell plates

	Order	Model 3	Model 4
CPU Times (sec)	2	0.88	0.52
	3	6.89	5.49
	4	23.55	15.72
Mean Errors (mm)	2	13.53	13.73
	3	12.45	12.54
	4	10.79	12.31

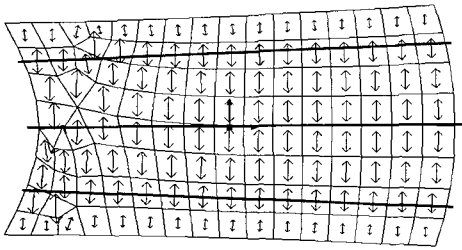
Fig. 4 와 Fig. 5 는 이중곡을 가진 선체 외판에 대한 설계 곡면과 전개 가능 근사 곡면을 보여 주고 있으며, Table 3 은 그 계산 결과를 보여 주

고 있다. 일반적인 부드러운 자유 곡면에서도 좋은 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

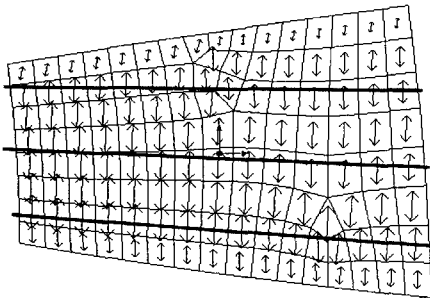
#### 4.2 롤 굽힘 가공 정보의 산출

4.1 절에서 제안된 차수를 가진 Polynomial 곡면에서 사용된 모델에 대한 롤 굽힘 가공 정보의 산출에 관하여 검토한다. 롤 굽힘 가공 정보는 롤 굽힘 방향, 중앙 롤러의 변위, 측면 롤러의 간격 등을 포함할 수 있지만 이중에서 롤 굽힘 방향에 대한 정보를 제공하는 롤라인의 위치에 대해 살펴보고자 한다. 중앙 롤러의 변위나 측면 롤러의 간격 등을 결정하는 것은 곡면 가공법의 변위에 대한 기하학적인 특성(Kinematics)만으로 예측될 수 있는 단순한 문제가 아니므로(김유일 등 1996, Shin et al. 2002) 향후 심화 연구가 필요한 분야이다.

롤 굽힘의 방향은 전개 가능 곡면이 제공하는 주곡률 방향(Principal direction)으로 결정할 수 있다. Fig. 6 은 (Model 3)과 (Model 4)의 임의 위치에서 최대 곡률, 즉 주곡률의 방향과 제안된 굽힘 방향(Roll-lines)을 보여주고 있다. 롤 굽힘 방향은 주곡률 방향의 수직 방향을 참고함으로써 결정될 수 있다. Fig. 6 의 결과는 정확한 롤라인의



(a) Proposed roll-line for Model 3



(b) Proposed roll-line for Model 4

Fig. 6 Principal curvature/direction and proposed roll-lines

개수가 고려된 것은 아니며 정성적인 방향만을 표시한 것이다.

#### 4.3 Polynomial 곡면식의 한계

C1(Tangency), C2(Curvature) 연속 조건을 만족하는 부드러운 설계 곡면을 Polynomial 곡면식으로 표현된 전개 가능 곡면으로 근사하는 경우 정성, 정량적으로 좋은 결과를 제시한다. 그러나 Side-tangent line 이나 Bottom-tangent line 을 포함한 선체 곡외판, 즉 선체에서 tangent line 을 경계로 일부는 평면이고 나머지 일부는 곡면인 곡판의 경우에 적용하는 것에는 한계를 가진다. Polynomial 곡면식이 이러한 곡면의 특성을 표현하지 못하는 한계로 기인하게 된다.

### 5. 결론

많은 조선소에서는 롤 굽힘에 의해서 또는 열간 가공법 중 하나인 선상가열 작업과 병행하는

방법으로 선체 곡판들이 가공되고 있다. 선체 곡판의 가공 공정에서 롤 굽힘 작업은 항상 선행되는 작업이다. 본 논문에서는 롤 굽힘 가공의 형상을 전개 가능한 Polynomial 곡면으로 근사하여 예측하는 알고리즘을 제안하였다.

롤 굽힘 가공 형상은 가우스 곡률이 영(Zero)인 전개 가능한 곡면이라는 가정으로부터 제약조건을 정립하고 주어진 목적 곡면과 최근접 형상을 가지도록 목적 함수를 정의하였다. 그리고 전역 최적화 기법 중 하나인 DE 를 사용하여 최적해를 계산하였다.

선체 곡판에 제안한 알고리즘을 적용한 결과를 통해 근사 롤 굽힘 가공 형상을 얻는데 효율적임을 알 수 있으며, 주곡률의 분포 등을 통해 타당성을 확인할 수 있었다.

이 연구는 선체 외판의 가공 공정의 변수들을 산출하는데 활용이 가능할 것으로 보이며, 향후 롤 굽힘 가공의 정량화 등을 위해 롤러들의 변위와 곡판의 변형의 관계에 관한 심화 연구가 필요하다.

### 후 기

본 논문의 내용은 인하대학교 대학원 조선공학과 BK21 사업팀, “차세대 선박 설계 및 생산 전문 인력 양성 사업팀”의 지원으로 수행되었으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 김유일, 신중계, 이장현, 1996, “Roll Bending Machine 에 의한 선체외판의 곡면가공 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 33권 제 4호, pp. 142-149.
- 박대준, 신중계, 김원돈, 1996, “이중곡을 갖는 판의 일차 가공에서 굽힘 영역과 곡률의 결정,” 대한조선학회 추계 학술대회 논문집, pp. 455-458.
- 윤대규, 신중계, 류철호, 1999, “최소 2 차 가공을 위한 이중 곡면의 롤러 굽힘 형상



결정," 대한조선학회 논문집, 제 36 권, 제 3 호, pp. 135 - 144.

- Hardt, D.E., Constantine, E. and Wright, A., 1992, "A Model of the Sequential Bending Process for Manufacturing Simulation." Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 181-187.
- Goldman, R., 2005, "Curvature Formulas for Implicit Curves and Surfaces," Computer Aided Geometric Design, Vol. 22, pp. 232-658.
- Pottmann, M. and Farin, G. 1995, "Developable Rational Bezier and B-spline Surfaces," Computer Aided Geometric Design, Vol. 12, pp. 513-531.
- Pottmann, M. and Wallner, J., 1999, "Approximation Algorithms for Developable Surfaces," Computer Aided Geometric Design, Vol. 16, pp. 539-556.
- Randrup, T., 1998, "Approximation by cylinder surfaces," Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 10, pp. 807-812.
- Shin, J.G., Won, S.I., Ryu, C.H., Yim, H., and Lee, J.H., 2002, "Object-Oriented Development of an Integrated System for Manufacturing Information of Roll Bending Process," Journal of Ship Production, Vol. 18, No. 2, pp. 86-91.

- Storn, R. and Price, K., 1995, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces," International Computer Science Institute, Technical Report TR-95-012.
- Storn, R., 1996, "On the Usage of Differential Evolution for Function Optimization," in Proceedings of the 1996 Biennial Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), pp. 519-523 (Berkeley, CA).



< 유철호 >



< 이장현 >



< 윤종성 >