

자동 메쉬 생성을 적용한 향상된 자유 곡면의 최적 근사 전개 알고리즘

유철호*, 신종계**

Improved Optimal Approximated Unfolding Algorithm of a Curved Shell Plate with Automatic Mesh Generation

Ryu, C. H.* and Shin, J. G.**

ABSTRACT

Surfaces of many engineering structures, especially, those of ships are commonly made out of either single- or double-curved surfaces to meet functional requirements. The first step in the fabrication process of a three-dimensional design surface is unfolding or flattening the surface, otherwise known as planar development, so that manufacturers can determine the initial flat plate which is required to form the design shape. In this paper, an algorithm for optimal approximated development of a general curved surface, including both single- and double-curved surfaces, is established by minimizing the strain energy of deformation from its planar development to the design surface. The unfolding process is formulated into a constrained nonlinear programming problem, based on the deformation theory and finite element. Constraints are subjected to the characteristics of the fabrication method. And the design surface, or the curved shell plate is subdivided by automatic mesh generation.

Key words : automatic mesh generation, optimal surface development, strain energy, nonlinear deformation theory, finite element

1. 서 론

선박과 항공기의 외관은 곡면으로 구성되어 있다. 그 곡면이 매우 크기 때문에 곡면을 한꺼번에 제작하지 못하고 수많은 곡판들로 분할하여 제작한 후 용접하는 과정을 거치게 된다. 선박의 경우 각 판의 설계 곡면은 냉간 가공과 열간 가공 등을 통해서 평평한 판으로부터 점진적으로 만들어진다. 실제 곡면에 대응하는 초기 평면 형상을 결정하는 과정을 전개(Unfolding)라 하고 그 초기 평면 형상을 전개 형상(Unfolded shape)이라고 한다.

전개 형상은 설계 곡면의 곡률의 특성과 성형 방법에 따라 달라지게 된다. 선체 외관의 경우 각 곡판은

평판에 인장이나 수축 변형을 발생하여 성형되는데 성형 방법에 따라 수축량 및 인장량이 다르기 때문에 성형 방법에 대응되는 전개 형상이 결정되어야 한다. 그리고 각 곡판에 대해 일관된 전개법이 정립되어 있지 않고 선체 외관에서 위치에 따라 설계자의 경험적 지식이 많이 관여하게 되어 오차를 줄이기 위해 다른 전개법이 적용된다.

본 논문에서는 임의의 곡면에 대해 일관되게 적용할 수 있는 새로운 자동 전개법을 개발하여 그 응용 및 성능을 검증하였다.

본 저자들은 본 논문의 선행 결과¹⁾에서 재료의 전개 형상과 설계 형상 사이의 변형 기하 해석을 기반으로 하여 대변형에 대한 비선형 변형률 텐서를 정식화하고 그 관계식을 이용하여 변형률 에너지를 최소화하도록 전개 형상을 결정하는 알고리즘을 구현하였다. 당시 연구는 설계 곡면을 정규 격자로 분할하여 4절점 유한 요소를 생성하였기 때문에 적용 대상물 사각형 설계 곡면에 국한하였고 설계 곡면의 곡률 분포

*교신저자, 정회원, 서울대학교 공학연구소

U.S. Naval Postgraduate School 연수 중

**중신회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수

- 논문투고일: 2005. 09. 12

- 심사완료일: 2005. 10. 06

를 반영하지 못하였다.

본 논문에서는 이 제약을 개선하여 임의 n 각형 설계 곡면에 적용할 수 있고 설계 곡면의 곡률 분포를 반영할 수 있도록 4절점 유한 요소를 자동으로 생성할 수 있는 메쉬 자동 생성 기능^[2]을 포함시켜 제안한 최적 근사 전개 알고리즘을 개선하였다.

본 논문의 2절에서는 선행 연구에서 제안한 최적 근사 전개 알고리즘을 요약하였다. 그리고 3절에서는 설계 곡면의 자동 메쉬 생성의 도입에 따라 수정 및 개선된 전개 알고리즘을 설명하였다. 마지막으로 수정된 알고리즘을 실제 선체 곡면에 적용하여 그 결과를 기존의 결과와 비교하여, 본 논문에서 제안하는 자동 메쉬를 적용한 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 최적 근사 전개의 정식화

본 장에서는 본 저자들이 제안한 전개 알고리즘을 간략히 소개한다. 자세한 내용은 선행 연구 결과를 참조하길 바란다^[1].

제안한 알고리즘은 임의의 형상을 가진 곡면의 비선형 변형 이론 기반 최적 근사 전개(Optimal Approximated Development based on Nonlinear Deformation Theory) 알고리즘이다. 판의 비선형 변형 이론 해석을 통해 비선형 변형률이 계산되며 계산된 비선형 변형률과 선형 구성 방정식으로부터 변형률 에너지가 계산된다. 또한 가공 방법의 역학적 특성과 유한 요소들의 기하학적 특성을 제약 조건으로 하여 변형률 에너지가 최소가 되도록 유한요소의 절점 좌표가 2차원 평면에서 계산된다. 최적화 알고리즘으로 빠른 수렴성과 안정성을 보이는 Sequential Quadratic Programming(SQP)이 이용된다.

2.1 판의 비선형 변형이론

판의 변형이론은 변위와 변형률 사이의 관계를 의미한다. 변형률 텐서로 식 (1)로 정의되는 그린-라그랑지(Green-Lagrange) 텐서 \mathbf{E} 를 채택하였다^[4].

$$\begin{aligned} d\mathbf{r} \cdot d\mathbf{r} - d\mathbf{r}_0 \cdot d\mathbf{r}_0 &= 2d\mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r}_0 \\ &= 2(\varepsilon_{xx}dx^2 + \varepsilon_{yy}dy^2 + \varepsilon_{zz}dz^2 + 2\varepsilon_{xy}dxdy \\ &\quad + 2\varepsilon_{yz}dydz + 2\varepsilon_{zx}dzdx) \\ &\cong 2(\varepsilon_{xx}dx^2 + 2\varepsilon_{xy}dxdy + \varepsilon_{yy}dy^2) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $d\mathbf{r}_0$ 는 초기 형상에서의 미소 선요소이고 $d\mathbf{r}$ 은

변형 후의 미소 선요소이다. 그리고 $\varepsilon_{ij}(i, j = x, y, z)$ 는 직교 좌표계에 대한 그린-라그랑지 변형률 텐서의 성분이며 두께 방향에 대한 성분, 즉 z -방향에 대한 성분 $\varepsilon_{zz}(i = x, y, z)$ 는 모두 영(0)의 값을 갖는다고 가정한다.

이중곡면의 성형에서 발생하는 인장과 수축의 특성을 파악하기 위해 변형률을 굽힘 변형률 텐서 \mathbf{E}^b 과 면내 변형률 텐서 \mathbf{E}^m 로 나누어 분석해 볼 수 있다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^m + \mathbf{E}^b \quad (2)$$

각각의 변형률의 성분은 식 (3)과 (4)와 같이 유도된다.

$$\varepsilon_{xx}^b = -zw_{,xx}, \quad \varepsilon_{xy}^b = -zw_{,xy}, \quad \varepsilon_{yy}^b = -zw_{,yy} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xx}^m = u_{,x}^0 + \frac{1}{2}[(u_{,x}^0)^2 + (v_{,x}^0)^2 + w_{,x}^2]$$

$$\varepsilon_{xy}^m = \frac{1}{2}[u_{,y}^0 + v_{,x}^0 + u_{,x}^0 u_{,y}^0 + v_{,x}^0 v_{,y}^0 + w_{,x} w_{,y}]$$

$$\varepsilon_{yy}^m = v_{,y}^0 + \frac{1}{2}[(u_{,y}^0)^2 + (v_{,y}^0)^2 + w_{,y}^2] \quad (4)$$

여기선 (u, v, w) 는 판의 임의 위치에서 변위이고 (u^0, v^0, w^0) 는 판의 중립면에서 변위이다. 각 식은 Shin and Ryu의 논문^[5]에 자세히 유도되어 있다.

2.2 변형이론의 수치적 접근

설계 곡면과 그 초기 형상, 즉 전개 형상에서 일대일 대응점을 찾을 수 없기 때문에 판의 전체에 걸쳐 변위를 구한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 설계 곡면을 4절점 등매개변수 판 요소로 분할하고 요소를 구성하는 절점 좌표와 절점에서 변위를 가지고 요소의 내부에서 좌표와 변위를 등매개변수 보간(isoparametric interpolation)을 통해 구한다. 이를 이용하면 분할된 요소의 절점에서만 변위를 구하게 되면 설계 곡면의 임의 위치에서 좌표와 변위를 계산하는 것이 가능하게 된다. 그리고 그 보간된 좌표와 변위로부터 변형률 텐서가 계산된다^[6].

좌표계와 변위에 대한 보간식을 기술하면 다음 식 (5)와 (6)과 같다.

$$x = \sum_{i=1}^4 h_i(r, s)x_i, \quad y = \sum_{i=1}^4 h_i(r, s)y_i \quad (5)$$

$$u = \sum_{i=1}^4 h_i(r, s)u_i, \quad v = \sum_{i=1}^4 h_i(r, s)v_i, \quad w = \sum_{i=1}^4 h_i(r, s)w_i$$

$$\theta_x = \sum_{i=1}^4 h_i(r,s)\theta_{xi} \quad \theta_y = \sum_{i=1}^4 h_i(r,s)\theta_{yi} \quad (6)$$

여기서 (x,y,z) 는 전체 좌표계에서 요소 내부 좌표이고 (x_p, y_p, z_i) 는 요소의 절점 좌표이다. $(u_p, v_p, w_p, \theta_{xi}, \theta_{yi})$ 는 요소 절점에서 변위이다. 그리고 (r, s) 는 4절점 판 요소의 지역 좌표계(Local coordinate)이다 $(-1 \leq r, s \leq 1)$.

2.2 최적 근사 전개의 정식화

2.2.1 설계변수 및 목적함수의 정의

본 알고리즘은 등매개변수 보간법을 이용하여 요소 내에서 변위와 위치가 식 (5)와 (6)으로부터 보간되고 변위와 변형률의 관계식, 식 (3)과 (4)를 통해 변형률이 계산된다. 그리고 요소 절점의 평면에서 좌표가 최적점으로 이동하며 반복 계산이 수행된다.

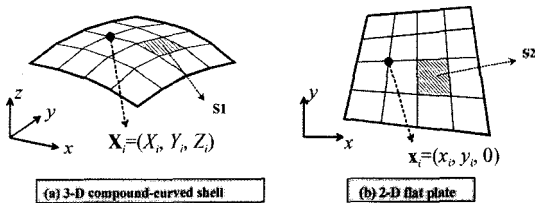


Fig. 1. Definition of design variables.

따라서 설계변수는 설계곡면을 근사시킨 유한 요소의 절점의 전개 평면에서의 2차원 좌표가 된다. 즉 설계변수 \mathbf{X} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_p, y_1, y_2, \dots, y_p\} \quad (7)$$

여기서 (x_p, y_p) 는 Fig. 1의 (b)에서와 같이 임의 절점의 평면에서 좌표이다. 절점의 개수를 p 개라 하면 설계변수는 총 $n - 2p$ 개가 된다.

목적 함수는 식 (8)과 같이 표현되는 변형률 에너지로 정의된다.

$$f(\mathbf{x}) = E = \frac{1}{2} \int_{V_r} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV \quad (8)$$

식 (8)은 아래 식과 같이 요소별로 이산화시킬 수 있다.

$$f(\mathbf{x}) = E = \sum_{i=1}^N E_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int_{V_i} \sigma_{pq}^i \epsilon_{pq}^i dV \quad (9)$$

여기서 C 는 각 요소별 변형률 에너지이고 V_i 는 각 요

소별 부피를 의미한다. N 은 전체 요소의 개수이다.

본 논문에서는 판의 변형을 탄성 대변형으로 가정하고 변형률과 응력의 관계, 즉 재료의 선형 구성 방정식을 적용하면 다음과 같이 변형률 에너지가 유도된다.

$$f(\mathbf{x}) = E = \sum_{i=1}^N E_i$$

$$E_i = \frac{E_Y}{2(1-\nu^2)} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \int_{h/2}^{h/2} ((\epsilon_{xx}^i)^2 + (\epsilon_{yy}^i)^2 + 2\nu \epsilon_{xx}^i \epsilon_{yy}^i + \frac{1-\nu}{2} (\gamma_{xy}^i)^2) dz \right\} \det \mathbf{J} dr ds \quad (10)$$

여기서 E_Y 는 탄성계수이고 ν 는 포아송비이다. h 는 판의 두께이며, \mathbf{J} 는 야코비 행렬이다.

절점의 이동변위 $\mathbf{U}_i = (u_p, v_p, w_p)$ 는 다음과 같이 정의되며,

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{X}_i - \mathbf{x}_i = (X_i - x_p, Y_i - y_p, Z_i) \quad (11)$$

변위와 변형률의 관계, 식 (3), (4)로부터 변형률은 (x_p, y_p) 의 함수가 되기 때문에 결과적으로 식(10)으로 표현되는 목적함수, 즉 변형률 에너지 E 는 (x_p, y_p) 의 함수이다.

2.2.2 제약조건의 정의

곡면을 성형하는 방법은 여러 가지가 있다. 역학적으로 인장을 발생시켜 곡면을 가공하는 방법과 수축을 유발시켜 곡면을 가공하는 방법으로 대별할 수 있다. 따라서 제약 조건은 곡면의 가공 조건과 가공 과정을 고려하여 정의될 필요가 있다. 본 논문에서 대상으로 하는 곡면 가공 방법은 선상 가열법 및 롤러에 의한 굽힘 가공법이다¹⁷⁾.

물체의 크기의 변화는 변형률로 측정될 수 있다. 본 논문에서 판의 비선형 변형기하해석을 통해 변위와 변형률의 관계를 정의하였으며 정의된 전체 변형률은 굽힘 변형률과 면내 변형률로 분해하였다. 강재에 열을 가함으로써 국부적인 수축을 발생시켜 곡면을 가공하는 선상 가열이 적용되는 경우 면내 변형률은 임의 지점에서 판의 두께 방향에 따라 동일한 값을 가지며 굽힘 변형률은 판의 두께 방향에 따라 선형적으로 변한다. 판의 중앙면에서 굽힘 변형률은 영(0)이다.

본 논문에서는 판의 크기의 변화에 대한 척도로 판의 중앙면에서 측정되는 변형률, 즉 면내 변형률을 선

정한다. 변형을 측정이 판의 두께 방향에 대해 어느 위치에서 이루어지느냐에 따라 변형률의 부호가 달라지는데 대체로 가열이 수행되는 면과 중앙면에서 변형률이 음(-)의 부호를 가진다.

선상 가열은 판을 수축시키게 되므로 전체적으로 판의 크기가 줄어들게 된다. 곡면의 가공 방향에 대해 최대 변형을 일으키는 것으로 알려져 있으므로, 주 면내변형률(Principal In-plane strain)에 제약 조건을 부여하면 판에 대한 수축 조건을 만족시킬 수 있다. 다음 조건을 만족하는 두 개의 주 면내변형률을 $\epsilon_1^m, \epsilon_2^m$ 라 하면,

$$\epsilon_2^m < \epsilon_1^m < 0 \quad (12)$$

면내 변형률에 대한 제약 조건은 제 1 면내 변형률에 대해

$$\epsilon_1^m = \left(\frac{\epsilon_{xx}^m + \epsilon_{yy}^m}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{xx}^m - \epsilon_{yy}^m}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}^m}{2} \right)^2} < 0 \quad (13)$$

으로 정의된다. 그러나 이 제약 조건을 판의 모든 위치에 부여한다는 것은 불가능하기 때문에 각 요소별로 다음과 같이 제약 조건을 부여하기로 한다.

$$IS_i = \iint_{A_i} \epsilon_1^m \det J dr ds < 0 \quad (14)$$

IS_i 는 i 번째 요소의 면적에 대한 변형률의 적분값이 된다. 여기서 $i = 1, 2, 3, \dots, N$

3. 곡면의 자동 메쉬 생성

본 논문에서는 4절점 요소를 필요로 하기 때문에 곡면의 자동 메쉬 생성을 위한 알고리즘으로 Advancing Front Method (AFM)의 하나인 Paving 방법을 선정하여 구현하였다. Paving 방법은 Blacker and Stephenson^[2]에 의해 처음 제안되었고 Cass *et al.*^[3]에 의해 3차원 곡면으로 확장되었다. Paving 방법은 모든 경계에서의 절점 수가 짝수이면 모든 요소를 사각형으로 생성하게 된다. 메쉬 생성의 예는 5장의 계산 예를 참조할 수 있다. 본 논문에서는 사변형 곡면에 대해 정규 격자로 요소를 생성한 경우와 자동 메쉬로 요소를 생성한 경우에 대해 비교 검토한다.

4. 최적화를 위한 설계 변수의 초기값

설계 변수의 초기값은 최적화 계산의 성능에 큰 영

향을 미친다. 따라서 초기값은 신중히 결정되어야 한다. 본 논문에서는 곡면의 일반 미분 기하학을 이용하여 2차원 형상을 얻는, 널리 알려진 방법을 구현하여 그 결과를 초기값으로 선정한다. 이 과정은 현재 조선소에서 선체 곡면을 전개하는 방법과 유사하거나 그 일반화된 방법이라고 볼 수 있다. 3차원 곡선의 등거리 사상(isometric mapping)을 기반으로 하는 전개법을 구현한 결과를 초기값으로 한다^[10].

Manning은 Isometric tree를 기반으로 하여 이중 곡면, 즉 전개가 불가능한 곡면에 대한 평면에서의 패턴을 얻는 방법을 제안하였다. 여기서 'isometric'이란 길이가 보존된다는 것을 의미한다. Manning은 곡면에서 기준선(Spine)과 그 기준선으로부터 가지쳐 나온 가지선들(Branches)로 곡면을 와이어프레임(Wireframe)으로 간략화한 후 각 3차원 곡선들을 2차원 평면으로 사상시킴으로써 곡면의 2차원 패턴을 획득하였다. 이 결과를 선체의 곡면들에 적용하기 위해서 곡면의 특성과 가공 방법에 따라 얻어진 패턴(전개 형상)에 대해 후행 작업을 수행해야 하고 기준선의 위치와 가지선의 개수에 따라 영향을 받기 때문에 일관성있는 전개법으로 선택하기 어려우나 최적 전개 형상을 얻기 위한 초기값을 결정하는 도구로 사용하기에는 부리가 없다.

5. 제안된 알고리즘의 계산 예

먼저 실제 선체 외판을 구성하는 자유 곡면에 적용하여 국내 조선사로부터 획득한 전개 결과와 본 알고리즘에 의한 결과를 비교 검토하여 본 알고리즘의 실용성 및 타당성을 보이기로 한다. 그리고 본 연구에서 제안한 설계 변수의 초기값의 우수성을 검증하고 이 방법으로 얻어진 설계 변수의 초기값에 대해 기존에 구현된 알고리즘과 수정된 알고리즘의 성능을 검토하기로 한다. 본 장에서 사용되는 모델들은 모두 국내 조선소에서 제공해 준 컨테이너선의 선체 외판 모델이다.

5.1 선체 외판 적용 예 및 타당성 검토

선박의 실제 외판에 적용하여 그 타당성을 검토해 보기로 한다. 선체 외판은 부위별로 생성되는 형상이 조금씩 차이가 발생하는데 대표적으로 난이도가 높다고 하는 세 가지 판에 대해 본 논문의 알고리즘을 적용한 전개 결과를 제시한다. Fig. 2~Fig. 4는 대상 선체 외판의 설계 곡면과 전개 형상을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 5는 오각형 판에 대한 예를 보여주고 있

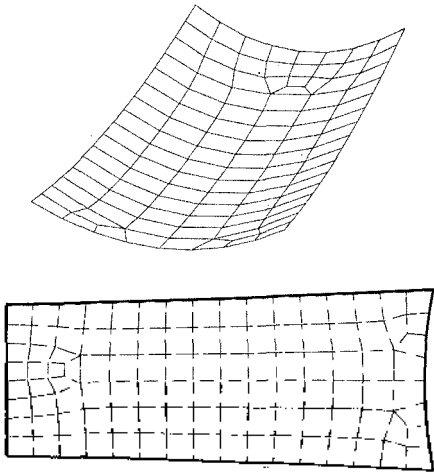


Fig. 2. Design model and unfolded shape of Model 1.

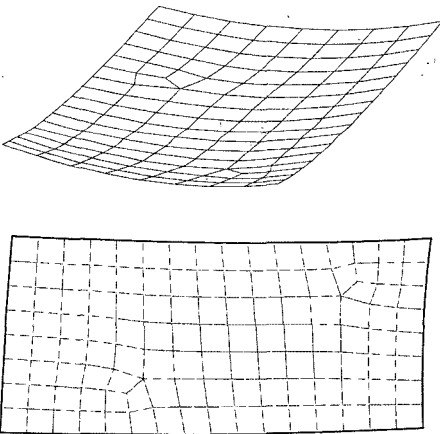


Fig. 3. Design model and unfolded shape of Model 2.

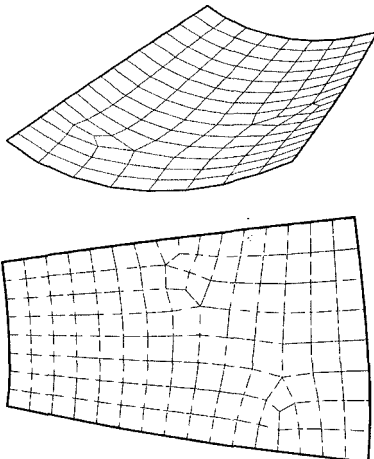


Fig. 4. Design model and unfolded shape of Model 3.

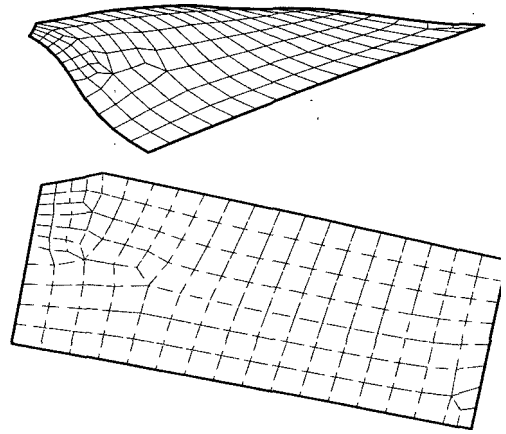


Fig. 5. Design model and unfolded shape of Model 4.

다. Model 4는 비교할 대상이 없었고 정규 격자형으로 분할이 불가능하기 때문에 본 논문에서 목적 형상과 전개 형상만을 제시하였다.

조선소에서 널리 사용되는 방법과 본 논문에서 제시한 최적 전개 알고리즘의 결과를 비교하여 실제 선체 외판 생산 설계에 이용가능한지를 살펴보도록 한다. 두 결과를 정밀하게 비교할 수 있는 방법은 없었으며, 담당 설계자들은 선체 외판 경계, 각각의 양 쪽 지점 사이 직선 거리와 대각선의 길이를 비교하는 것만으로 충분하다고 말한다. 따라서 본 논문에서 비교할 내용은 선체 외판 경계, 각각의 양 쪽지점 사이 직선거리와 대각선의 길이로 이 값이 선체 외판의 길이의 특성과 각 경계가 이루는 각도의 특성을 대표한다고 할 수 있겠다.

Table 1은 Model 1, Model 2, Model 3에 대해 본 알고리즘을 통해 계산된 전개 결과와 모델을 제공해 준 조선소에서 전개한 결과의 특성값을 보여주고 있다. 각 모델별로 각 길이상에 차이를 보여주고 있다. 이중 곡면의 전개는 유일해가 존재하지 않기 때문에 어느 것이 옳다고 단언하기는 어렵다. 조선소에서는 선체 외판을 성형할 때 오차를 고려하여 가공 마진(forming margin)을 부여하고 그 값은 각 판의 위치와 성형 난이도에 따라 다르지만 본 논문에서 이용된 모델의 경우 30~50 (mm)를 성형 마진으로 제공한다. 이를 고려하여 보면 본 논문의 결과가 그 오차 범위내 모두 포함되기 때문에 타당한 전개 결과를 도출하고 있다고 판단할 수 있다.

5.2 설계 변수의 초기값 설정의 효과

본 논문에서 다음의 두 경우로 설계 변수의 초기값

Table 1. Characteristic values for verification of unfolding algorithm (unit: mm)

Model	Method	Edge1	Edge2	Edge3	Edge4	Diag1	Diag2
1	Yard	2292	1028	2292	864	2479	2479
	This paper	2295.95	1031.12	2296.07	863.70	2482.45	2482.32
2	Yard	2674	1313	2647	1362	3038	2916
	This paper	2685.79	1313.72	2659.93	1359.92	3048.95	2926.63
3	Yard	3356	2458	3269	1446	3712	3908
	This paper	3377.54	2447.92	3280.6	1440.36	3715.08	3926.67

Table 2. Effects of initial values for automatic meshes

Model	Size (Nodes)	Cost	CASE1		CASE2	
			Iteration	Time(sec)	Iteration	Time(sec)
1	128	11.9	396	23.7	365	18.3
2	142	32.1	603	47.9	506	35.5
3	147	48.6	730	66.0	476	31.1

을 정의하고 그 성능을 비교한다.

CASE1: 설계 곡면의 각 절점을 평면에 투영한 값을 초기값으로 가지는 경우, 즉 $x_{i0} = X_i, y_{i0} = Y_i$.

CASE2: Isometric Tree Mapping의 결과를 초기값으로 가지는 경우

동일 메쉬 모델에 대해 CASE1과 CASE2를 적용하여 목적함수와 계산 시간 등을 비교하였다. Table 2가 그 결과를 보여주고 있다. 3가지 모델에 대해 모두 CASE2가 CASE1에 비해서 월등히 좋은 성능을 보여주고 있다.

5.3 자동 메쉬 생성이 전개 결과에 미치는 효과

본 논문에서 제안한 자동 메쉬 생성이 전개 결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 정규 격자형으로 요소를 생성한 경우의 전개 결과와 비교한다. 자동 메쉬의 결과는 Table 1의 CASE2와 동일하기 때문에 따로 표시하지 않는다. 격자형으로 요소를 생성하는 경우 자동 메쉬와 동일한 자유도의 모델을 만들기 어렵기 때문에 가능한 자동 메쉬의 자유도와 가깝도록 격자형 요소를 생성하였다.

Table 3의 결과를 보면 Model 1의 경우에 자동 메쉬의 결과보다 빠른 수렴성을 보였다. 이것은 Model 1의 격자형 요소가 자유도가 “7” 정도 작다는 것을 반영하였다고 판단이 된다.

그리고 모든 모델에 대해 목적 함수를 비교해 보면 자동 메쉬의 결과가 더 작은 결과를 보여주고 있다. 이것은 선체 외판 성형을 위한 변형을 에너지가 작다. 즉 곡면을 더 수월히 가공할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 3. Results of structural grid

Model	Size	Cost	Iteration	Time(sec)
1	11x11	13.5	278	13.3
2	13x11	32.8	706	62.6
3	12x12	49.8	1084	87.3

6. 결 론

본 논문에서는 저자들이 자유 곡면의 평면으로의 전개에 관해 수행하였던 기존의 연구를 임의의 다각형에 적용이 되고 곡면의 곡률을 고려할 수 있도록 확장하였다. 기존 알고리즘의 실용성과 정밀도를 향상시키기 위해 자동 메쉬 생성을 적용한 향상된 최적 근사 전개 알고리즘을 제시하였으며 선체 외판에 적용하고 그 결과를 비교 검토하여 타당성 및 실용성을 검토하였다.

선체 부위별로 작업자의 경험에 비추어 다양하게 적용되던 종래의 전개법들과 달리 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통해서 설계 곡면들에 대해 동일한 전개법을 사용하여 일관성 있게 자동으로 전개 형상을 결정할 수 있다. 또한 변형을, 변위, 가공 방향 등과 같은 설계 곡면을 획득하기 위한 가공 정보를 제공할 수 있는 효율성 높은 알고리즘이다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임

밝히며 이에 감사드립니다(과제번호M01-2005-000-10316-0).

참고문헌

1. 유철호, 신종계, “변형 이론을 기반으로 한 곡면의 최적 근사 전개”, 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol. 7, No. 3, pp. 190-201, 2002.
2. Blacker, T. D. and Stephenson, M. B., “Paving: A New Approach to Automated Quadrilateral Mesh Generation”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 32, pp. 811-847, 1991.
3. Cass, R. J., Benzley, S. E., Meyers, R. J. and Blacker, T. D., “Generalized 3-D Paving: An Automated Quadrilateral Surface Mesh Generation Algorithm”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 39, pp. 1475-1489, 1996.
4. Malvern, L. E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice Hall, Englewood

- Cliffs, N. J., 1969.
5. Shin, J. G. and Ryu, C. H., “Nonlinear Kinematic Analysis of the Deformation of Plates for the Ship Hull Fabrication”, *Journal of Ship Research*, Vol. 44, No. 4, pp. 270-277, 2000.
6. Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1996.
7. 이장현, 신종계, “유한요소해석과 다변수해석에 의한 선상가열 변형 관계식”, 대한조선학회논문집, 제 39권, 제2호, pp. 69-80, 2002.
8. 김용균, 신종계, “열변형 해석 기구를 통한 선상가열에서의 가열선 수성에 관한 연구”, 대한조선학회 논문집, 제39권, 제2호, pp. 45-51, 2002.
9. 김유일, 신종계, 이장현, “Roll bending machine에 의한 선체외판의 곡면가공해석”, 대한조선학회 논문집, 제33권, 제4호, pp. 142-149, 1996.
10. Manning, J. R., “Computerized Pattern Cutting”, *Computer-Aided Design*, Vol. 12, No. 1, pp. 43-47, 1980.



유 철 호

1996년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 1998년 서울대학교 조선해양공학과 석사
 2002년 서울대학교 조선해양공학과 박사
 2002년~ 서울대학교 공학연구소 연구원
 2005년 7월~현재 U.S. Naval Post-graduate School 박사후 연수
 관심분야: 선박생산공학, Digital Shipbuilding, 곡면 전개 및 성형



신 종 계

1977년 서울대학교 조선공학과 학사
 1979년 서울대학교 조선공학과 석사
 1988년 미국 M.I.T. Ocean Engineering 박사
 1979년~1993년 한국기계연구원 구조시스템 연구부 책임연구원
 1993년~서울대학교 조선해양공학과 교수

2001년~ 디지털선박기술센터(Digital Shipbuilding Innovation Center) 대표
 관심분야: 생산시스템 공학 및 Digital Manufacturing, 조선산업의 IT접목(Digital Shipbuilding System), 생산 정보공학, 유체-구조 연성, 비선형구조해석