

## 변형 이론을 기반으로한 곡면의 최적 근사 전개

유철호\*, 신종계\*\*

### Optimal Approximated Development of General Curved Plates Based on Deformation Theory

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

#### ABSTRACT

Surfaces of many engineering structures, specially, those of ships and airplanes are commonly fabricated as doubly curved shapes as well as singly curved surfaces to fulfill functional requirements. Given a three dimensional design surface, the first step in the fabrication process is unfolding or planar development of this surfaces into a planar shape so that the manufacturer can determine the initial shape of the flat plate. Also a good planar development enables the manufacturer to estimate the strain distribution required to form the design shape. In this paper, an algorithm for optimal approximated development of a general curved surface, including both singly and doubly curved surface is developed in the sense that the strain energy from its planar development to the design surface is minimized, subjected to some constraints. The development process is formulated into a constrained nonlinear programming problem, which is on basis of deformation theory and finite element. Constraints are subjected to characteristics of the fabrication method. Some examples on typical surfaces and the practical ship surfaces show the effectiveness of this algorithm.

**Key words :** general curved surface, strain energy, optimal development, deformation theory, finite element

#### 1. 서 론

곡면은 곡률의 특성에 따라서 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 수학적으로, 임의의 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<sup>1)</sup>. 역학적으로, 전개 가능한 곡면은 인장이나 수축의 변형 없이 단순 굽힘만으로 제작이 가능하고, 전개 불가능한 곡면은 그렇지 못하다. 각각의 곡면을 단순 곡면(singly curved surface), 이중 곡면

(doubly curved surface)이라 부른다.

전개 불가능한 이중 곡면의 제작이 전개 가능한 단순 곡면의 제작에 비해 많은 공수가 투입되기 때문에 생산성 향상에 많은 지장을 초래하게 된다. 또한 단순 곡면이 쉽게 평면으로의 전개가 가능하므로 단순 곡면이 선호되어 진다. 그러나 선박이나 항공기와 같이 구조물의 기능 및 성능상의 이유로 이중 곡면이 채택되어야 하는 경우가 많이 있다.

가공하고자 하는 대상이 주어지면, 가공 단계에서 가장 먼저 수행되어야 할 단계가 그 곡면의 평면으로의 전개 형상을 찾는 것이다. 목적하는 대상, 즉 목적 곡면을 얻기 위한 작업 공정이 평면 전개 형상으로부터 수행되는 것이다. 전개 형상은 가공을 위한 초기 평면 형상으로서의 역할을 수행하게 된다. 그리고 곡면의 전개 형상은 대개 유일하지 않다. 곡면을 가공하기 위한 방법들의 역학적 특성으로 인해 그에 상응하는 초기 평면 형상이 요구되는데, 이것은 가공 방법에 따라서

\*서울대학교 대학원 조선해양공학과 박사과정, 해양시스템공학연구소(RIMSE) 연구원

\*\*중신회원, 서울대학교 조선해양공학과 부교수, 해양시스템공학연구소(RIMSE)

- 논문투고일: 2002. 3. 27

- 심사완료일: 2002. 5. 7

초기 평면 형상에 가해야 할 수축량 및 인장량이 달라 지기 때문이다. 그리고 임의 초기 평면 형상이 존재한다고 할 때, 임의 수축과 인장의 적용이 가능하다면 초기 평면 형상이 유일하게 존재하지 않는 이유가 된다. 따라서 초기 평면 형상으로부터 목적 곡면을 얻기 위해서 생산성 및 작업의 효율성을 고려하여 적정 가공 방법이 선정되어야 하며, 그 가공법에 따라 최소 수축 또는 인장이 가해지는 초기 평면 형상의 결정이 중요하게 된다.

곡면의 전개 형상의 결정은 과거에도 그랬지만 현재에도 많은 부분을 설계자의 경험 및 지식에 많은 부분을 의존하여 오고 있는 실정인데 경험적 지식에 많이 의존하고 설계자에 따라 결과가 달리 나오는 경우에 있어서 설계 전산화는 쉬운 작업이 아니다. 선체 외판의 부위에 따른 전개법의 일관성이 결여되어 있으며 전문가의 경험적 지식이 많이 관여하게 된다. 또한 곡면의 곡률이 커지면 커질수록 오차를 많이 포함하게 된다. 따라서 목적 곡면의 곡률이 큰 경우 대해서도 일관되게 적용할 수 있는 자동 전개법의 개발이 필요하다.

Clements<sup>2,3)</sup>는 전개 가능한 단순 곡면의 전개를 수행하였다. 전개 가능한 곡면은 초기 평면 형상의 획득과 가공의 용이성 때문에 많이 선호된다. 이러한 단순 곡면은 선직면(ruled surface)로 표현이 되는데 이 선직면은 인장 및 수축 없이 초기 평면 형상으로부터 가공이 가능하다<sup>4)</sup>. 그러나 전개가 불가능한 이중 곡면에 적용할 경우에 곡면의 선직면으로부터 근사화가 필요하게 된다.

Yang & Luo<sup>5)</sup>는 두꺼운 후판의 가공에 많이 사용되는 선상 가열 작업에서 열량의 소비량을 최소화하도록 전개형상을 결정하는 방법을 제안하였다. 여기서 평면의 형상에 영향을 미치는 것은 기준선의 위치와 전개될 평면이다. 이 평면은 기준선상의 한 점에서 곡면에 접하는 평면으로 정의된다. 따라서 이 접점과 기준선의 위치가 최적화를 위한 설계변수가 된다. 그러나 전개된 기준선과 프레임선이 목적 형상에서의 길이와 같게 되는데 이것은 가공 방법의 역학적 특성, 즉 가공시 수축을 반영하지 못하여 최종 형상에 여유값이 추가되어야 한다. 또한 사각형과 오각형 형태의 곡면에 대해서 적용이 어려운 문제점이 있다.

Letcher<sup>6)</sup>는 곡면을 성형할 때 수축과 인장 변형의 필요성을 보여주었다. 등방성 및 이방성 변형률을 기반으로 하는 곡면 전개법을 제안하였다. 초기 평면 형상에서 목적 곡면으로의 변형에 유발되는 변형률을 수학적으로 해석하여 일반화된 포아송 방정식

(Generalized Poisson equation)을 유도하였다. 이것은 초기 평면 형상의 경계 조건에 의해 해가 영향을 많이 받게 되어 정확한 계산을 위해서 미리 곡면의 모서리 위치가 올바르게 선정되어야 한다.

Ueda 등은 3차원 비선형 유한 요소를 이용하여 전개를 수행하였다<sup>7)</sup>. 목적 형상을 얻기 위해 고유 변형도를 적용할 수 있는 초기 평면 형상이 필요한 것이다. 유한 요소를 이용한 평면의 전개는 재료의 물성치와 역학적 거동을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 3차원 비선형 유한 요소 해석이 많은 계산 시간을 필요로 할뿐만 아니라 경계 조건에 따라 다른 결과를 제공하게 된다. 또한 가공방법의 특성을 포함하는지는 검토되지 않았다.

Manning<sup>8)</sup>은 3차원 곡선의 등거리 사상(isometric mapping)을 기반으로 하는 전개법을 개발하였다. Manning은 3차원 곡면을 임의 기준선(spine)과 그 기준선 상의 임의점으로부터 시작하는 가지선들(branches)로, 즉 와이어프레임(wireframe)으로 간략화한 후 이 3차원 곡선들을 순서대로 평면 곡선으로 사상시켰다. 곡면의 특성과 가공 방법에 따라 얻어진 전개 형상에 대한 후행 작업을 수행해야 한다. 그리고 이 방법은 기준선의 위치와 가지선의 개수에 따라 전개 형상이 달라 지지만 특히 기준선의 선정에 큰 영향을 받는다. 앞서 언급한 Yang & Luo<sup>5)</sup>의 방법과 유사한 방법으로 Yang & Luo가 이 방법을 최적화를 위해 재해석하였다고 볼 수 있다.

Shimada & Tada<sup>9)</sup>는 곡면을 많은 삼각형 요소로 분할하고 평면상의 삼각형 요소들과 일대일 대응시켜 이것을 평면 응력에 관한 선형 유한 요소 문제로 치환한 후 평면상 삼각형 요소들을 수정해가며 반복 계산을 수행하여 변형을 에너지가 최소가 되도록 하는 평면상의 삼각형 요소들을 결정하였다. 작업자의 간섭 없이 일괄적으로 계산할 수 있다는 장점이 있으나 선형 유한 요소 해석이 반복적으로 수행되는데 곡률이 큰 곡면의 경우 많은 반복 회수와 해석 시간이 걸리며, 금속 성형에서는 대변형이 발생하는데 선형 변형률 및 유한 요소 해석을 통해서 그 현상을 대변할 수 없다. 그리고 Shimada & Tada<sup>10)</sup>는 앞의 논문에서의 반복 계산 회수 및 계산 시간을 줄이기 위해 동적 프로그래밍(dynamic programming)을 통해 최적화를 수행한 결과를 발표하였다.

Hinds 등<sup>11)</sup>은 곡면을 많은 사변형 요소들로 근사화시킨 후 이 사변형 요소들을 평면으로 전개시킴으로써 전체 곡면의 평면 전개 형상을 획득하였다. 또한 사변형 요소를 삼각형 요소로 나누어 같은 방법을 적용하

였다. 이 때 곡면의 기하학적 특성상 발생하는 요소들의 전개 형상들의 겹침이나 벌어짐을 허용한다. 이 방법은 Manning<sup>[8]</sup>의 방법과 같이 기준선이 필요한데 이 기준선이 요소들의 전개 시작선이 된다. 이 방법 또한 시작선의 선정에 따라 전개 형상은 달라질 것이다.

Tribon<sup>[11]</sup>은 선박 설계에서 널리 사용되는 설계 지원 시스템으로 Hinds 등<sup>[10]</sup>이 제안한 방법과 유사한 방법을 선상 가열이라는 가공법에 맞도록 수정하여 전산화하였다. 이 시스템은 사변형 요소대신 삼각형 요소를 사용하였으며 곡면을 여러 개의 스트립으로 나누고 각 스트립을 삼각형 요소로 나누어 각 스트립을 순서대로 평면에 전개하였다.

Randrup<sup>[12]</sup>은 곡률이 매우 크지 않은 곡면의 가우스상(Gauss image)을 이용하여 근사 실린더형 곡면을 획득하였다. 획득된 실린더형 곡면은 전개 가능한 곡면이므로 쉽게 전개된 형상이 얻어진다. 이러한 전개 과정은 선체 곡 외곽의 가공 과정에서 많이 쓰이는 것으로 먼저 롤러로 평판으로부터 실린더형 곡면을 제작하고 선상 가열 및 기타 방법을 이용하여 그 실린더형 곡면을 목적 형상으로 만드는 과정과 부합하는 것이다<sup>[13]</sup>. 그러나 실린더형 곡면을 만들 때 그 곡면에서 경계선의 산출이 모호하며 곡률이 큰 경우에 근사 실린더형 곡면의 획득이 어렵다.

Yu 등<sup>[14]</sup>은 목적 곡면에서 초기 평면 형상으로서의 변형률이 최소가 되도록 하는 알고리즘을 제안하였다. 곡면의 기하학적 특성 및 최적화 기법을 이용하여 두 단계를 거쳐 전개 형상이 획득되는데, 먼저 곡면에 걸쳐 변형률의 합이 최소가 되도록 격자점에서 변형률이 계산되며, 그 다음으로 그 변형률을 가지고 최소 자승법을 이용하여 그 격자점의 초기 평면에서의 좌표가 구해진다. 일반적으로 임의의 곡면의 전개 형상을 획득할 수 있으나 계산 과정에서 비선형 최적화가 두 번에 걸쳐 수행되므로 계산 시간이 많이 축적되며 선형 변형률이 사용되어 대변형에 대한 변형률로는 부적합하다. 또한 변형률의 합이 주는 물리적 의미가 모호하다.

본 논문에서는 재료의 초기 평면 형상과 목적 형상 사이의 변형 기하를 기반으로 하여 대변형에 대한 비선형 변형률 텐서를 정식화하고 그 관계식을 이용하여 변형률 에너지를 최소화하도록 초기 평면 형상이 구해진다.

변형률 텐서로 그린-라그랑지(Green-Lagrange) 텐서를 채택하였다. 곡면 상에 있는 임의의 점에 대해 초기 평면 형상에서의 대응점을 결정하고 그 변위로부터 변형률 텐서를 구하는 것은 어렵다. 따라서 유한 요소법의 특징을 참고하여 곡면을 사변형 요소로 분할하고

격자점을 절점으로 하여 그 절점의 좌표와 변위를 가지고 요소의 내부점에서 변위를 등매개변수 보간(isoparametric interpolation)으로 구한다. 그리고 그 보간된 변위로부터 변형률 텐서가 계산될 수 있다.

그리고 각 요소 적분점에서 변형률 에너지(strain energy)들의 합을 목적 함수로 취하고 주어진 제한 조건으로 비선형 최적화 기법 중의 하나인 Sequential Quadratic Programming(SQP)를 이용하여 최적화가 수행된다. 제한 조건은 가공 방법의 역학적 특성에 따라 달라지게 된다.

## 2. 판의 변형 이론

### 2.1 판의 변형 이론

본 논문에서는 굽힘 변형과 면내 변형을 함께 일으키는 변형에 대한 가공 정보의 획득을 위한 방법으로 변형이론을 기반으로 기하학적 분석을 제안하여, 판의 초기 형상(Initial configuration)과 목적 형상(Final configuration)으로부터 주어지는 가공 정보 획득법을 제시하였다. 이것은 판의 초기 형상과 목적 형상이 주어지면 그들 사이의 변위로부터 변형 관계를 유추하여 유추된 변형으로부터 변형률을 계산하는 과정을 취한다.

목적하는 곡면을 얻기 위해 초기 형상에 가해지는 변형을 크게 굽힘 변형과 면내 변형으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 가공 정보 획득의 기준이 되는 물리량을 굽힘 변형과 면내 변형으로부터 유발되는 변형률로 잡았으며, 그 변형률 텐서로 직교 좌표계에 대해 다음 식과 같이 표현되는 그린-라그랑지 변형률 텐서를 이용하고 이를  $E$ 라 하면 다음과 같이 정의된다<sup>[15]</sup>.

$$\begin{aligned} dr \cdot dr - dr_0 \cdot dr_0 \\ = 2dr_0 \cdot E \cdot dr_0 \\ = 2(\epsilon_{xx}dx^2 + \gamma_{xy}dxdy + \epsilon_{yy}dy^2) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $dr_0$ 는 초기 형상에서의 미소 선요소이고  $dr$ 은 변형 후의 미소 선요소이다. 그리고  $\epsilon_{ij}$ 는 그린-라그랑지 변형률 텐서의 성분이며 두께 방향에 대한 성분, 즉  $z$ -방향에 대한 성분들,  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{zz}$ 는 모두 영(0)의 값을 갖는다고 가정한다.

판의 두께 방향의 전단 변형이 없다는 가정으로부터 판의 임의의 위치에서 변위( $u$ ,  $v$ ,  $w$ )는 판의 중앙면(mid-surface)의 변위( $u^0$ ,  $v^0$ ,  $w^0$ )로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u = u^0 - zw_{,x}, \quad v = v^0 - zw_{,y}, \quad w = w^0 \quad (2)$$

여기서 (,)는 각각  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 에 대한 편미분을 의미한다.

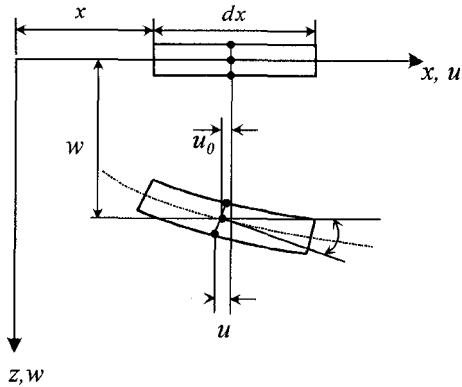


Fig. 1. Kinematics of flat plate for xz plane.

이중곡면의 가공에서 발생하는 인장과 수축의 특성을 파악하기 위해 변형률을 굽힘 변형률 텐서  $E^b$ 과 면내 변형률 텐서  $E^m$ 로 나누어 분석해 볼 수 있다.

$$E = E^b + E^m$$

초기 치질, 즉 초기 형상이 평면이 아닌 경우에 대한 변형 기하 해석의 응용은 Shin & Ryu<sup>[6]</sup>의 연구에 검토되어 있으며, 본 논문에서는 판의 전개에 관련하여 평판의 변형에 관심을 가지고 있으므로 평판의 변형기하 해석만을 검토하기로 한다.

Fig. 1과 같은 판의 미소 요소  $h(x, y)dx dy$ 를 생각해 보자.

변형 전 판은 평판으로 xy평면상에 존재하고 판의 중앙면(middle surface)에 대해 임의의 지점의 수직 거리를  $z(x, y)$ 라고 하면, 변형 전 판 상의 점들의 위치벡터는

$$r_0 = (x, y, z) \tag{3}$$

가 되며, 변형 후의 위치 벡터  $r$ 은 식 (2)로부터

$$r = (x + u^o - zw_{,x}, y + v^o - zw_{,y}, z + w) \tag{4}$$

가 된다.

식 (3)과 (4)를 조작하여 식 (1)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 변형률이 표현된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx}^m &= u_{,x}^o + \frac{1}{2}[(u_{,x}^o)^2 + (v_{,x}^o)^2 + w_{,x}^o] \\ \epsilon_{xy}^m &= \frac{1}{2}[u_{,y}^o + v_{,x}^o + u_{,x}^o u_{,y}^o + v_{,x}^o v_{,y}^o + w_{,x} w_{,y}] \\ \epsilon_{yy}^m &= v_{,y}^o + \frac{1}{2}[(u_{,y}^o)^2 + (v_{,y}^o)^2 + w_{,y}^o] \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx}^b &= -zw_{,xx} \\ \epsilon_{xy}^b &= -zw_{,xy} \\ \epsilon_{yy}^b &= -zw_{,yy} \end{aligned} \tag{6}$$

Kirchhoff의 가정에 의한 미소 변형의 문제에서는 판의 중앙면의 면내 변형을 의미하는  $u^o(x, y)$ 와  $v^o(x, y)$ 를 무시할 수 있으나, 이중곡을 가진 곡면을 성형하는 과정은 대변형 문제이고 판의 면내 변형을 수반한다. 특히 두꺼운 판재의 가공법으로 널리 사용되는 선상 가열에서의 역학적 현상을 보면, 가공 공정 중에 판의 수축 현상(shrinkage)이 현저함을 확인할 수 있어 이를 무시할 수 없다<sup>[6],[7]</sup>. 또한 식 (5)에 보이듯이 두꺼운 판재의 대변형 현상에는 굽힘 변형이 면내 변형률에 영향을 미치는 요소가 포함되어 있다는 것을 볼 수 있다.

### 2.2 변형 이론의 수치적 접근

2.1절에서 유도된 변형률 텐서를 기반으로 하여 굽힘 및 면내 변형률을 계산하기 위해서 초기 형상과 그에 따른 임의의 점에서의 변위를 알아야 한다. 임의의 점에서 변위( $u, v, w$ )는 판의 중립면의 변위( $u^o, v^o, w^o$ )가 주어지면 식 (2)로부터 계산될 수 있다. 그러나 판의 초기 형상에 대한 정보가 없는 상황에서 판의 전체에 걸쳐 변위를 구한다는 것은 매우 어렵다. 유한 요소법에서와 같이 각 절점의 평면에서의 위치를 계산하고 요소 내부는 등매개변수 보간을 이용함으로써 위치와 변위를 알 수 있다. 본 논문에서 곡면의 전개 형상이 변형 기하 해석을 위한 초기 평면 형상이 된다. 이 초기 평면 형상을 얻는 과정이 곡면의 전개 과정이 된다. 분할된 곡면에서 격자점에 대응하는 초기 평면에서의 위치가 절점에 해당하며 그 절점으로 유한 요소

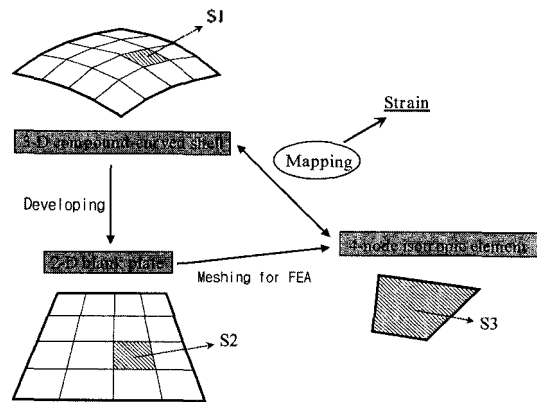


Fig. 2. Proposed mapping process to obtain strains.

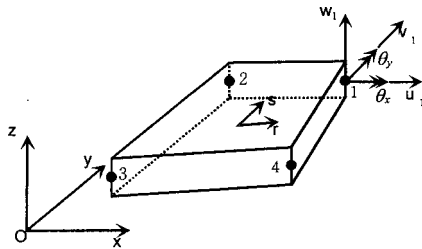


Fig. 3. Plate element.

가 만들어진다.

Fig. 2는 변형률을 계산하는 과정을 도식화한 것이다. 주어진 곡면(S1)을 여러 패치로 분할하고 전개를 수행하여 초기 평면 형상(S2)를 획득한다. 획득한 초기 평면 형상으로부터 유한 요소들(S3)을 생성하고 각 절점과 곡면(S1)에서 그 절점에 대응하는 점 사이에 변위를 계산하고, 요소 내부에 대해서는 그 변위에 대해 보간을 수행함으로써 식 (5)과 (6)의 변위와 변형률 관계식으로부터 변형률이 계산된다.

계산의 편의성을 위해 본 논문에선 4절점 등매개변수 판 요소가 이용된다<sup>[18]</sup>. Fig. 3에 보여진대로 이 요소는 각 절점에서  $(u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi})$ 의 5 자유도를 가지고 있다.  $u_i, v_i$ 는 각각  $x, y$  방향에 대한 각 절점의 변위이며,  $w_i$ 는  $z$  방향, 즉 처짐에 대한 변위이다. 그리고  $\theta_{xi}, \theta_{yi}$ 는 각변위를 나타낸다.  $(r, s)$ 는 각 요소의 국부 좌표계를,  $(x, y, z)$ 는 전체 좌표계를 나타낸다. 본 논문에서는 두께 방향의 전단 변형이 없다고 가정하였기 때문에 다음의 조건이 만족한다.

$$\theta_{xi} = \frac{\partial w_i}{\partial x}, \quad \theta_{yi} = \frac{\partial w_i}{\partial y} \quad (7)$$

등매개변수 정식화에서, 요소의 좌표와 변위는 형상 함수  $h_i$ 를 이용하여 다음처럼 표현된다. 형상 함수  $h_i$ 는 유한 요소 관련 교재에 널리 소개되어 있으므로 참고하면 된다<sup>[18]</sup>.

$$x = \sum_{i=0}^4 h_i(r,s)x_i, \quad y = \sum_{i=0}^4 h_i(r,s)y_i \quad (8)$$

$$u = \sum_{i=0}^4 h_i(r,s)u_i, \quad v = \sum_{i=0}^4 h_i(r,s)v_i,$$

$$w = \sum_{i=0}^4 h_i(r,s)w_i,$$

$$\theta_x = \sum_{i=0}^4 h_i(r,s)\theta_{xi}, \quad \theta_y = \sum_{i=0}^4 h_i(r,s)\theta_{yi} \quad (9)$$

Fig. 3에서 요소 좌표계  $(r, s)$ 와 전역 좌표계  $(x, y, z)$ 사이의 미분에 대한 변환 관계는 야코비 행렬 (Jacobian Matrix)  $J$ 로 나타내지는데 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

그리고  $(x, y)$ 에 대한 미분은 다음과 같이 야코비 행렬의 역행렬로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)은 목적함수와 제약조건의 해석적 미분을 위해 필요한 것들로서 이 식을 염두해 두고 본 논문에서 제안할 알고리즘을 3장에서 기술한다.

### 3. 최적 근사 전개의 정식화

본 논문에서는 임의의 형상을 가진 곡면의 비선형 변

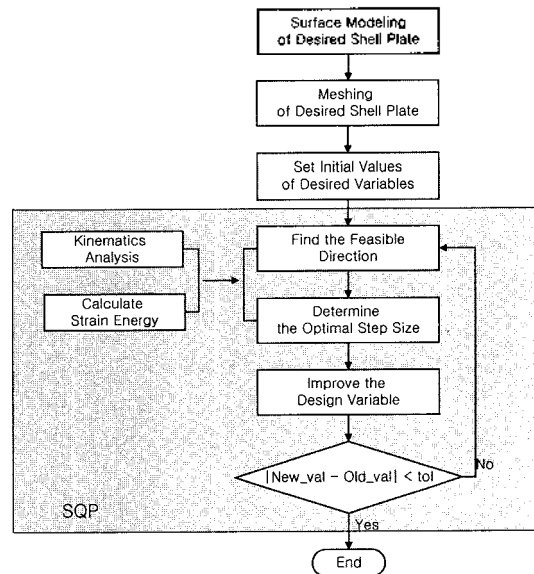


Fig. 4. Process flow of this algorithm.

형 이론 기반 최적 근사 전개(Optimal Approximated Development based on Nonlinear Deformation Theory) 알고리즘을 제안한다. 2장에서 제안된 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 유한요소에서 절점의 위치가 2차원 평면에서 계산된다. 최적화 알고리즘으로 SQP가 이용되는데 빠른 수렴성과 안정성을 보이는 알고리즘으로 현재에도 널리 사용되고 있다.

일반적인 최적화 과정을 위한 정식은 다음과 같이 요약된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x) \\ & \text{subject to } g_i(x) \geq 0, i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 설계 변수는  $x$ 이고  $f$ 와  $g_i$ 는 각각 목적함수와 제약조건이며  $x$ 에 대해 미분 가능한 연속함수이다.  $m$ 은 제한 조건의 개수이다.

### 3.1 설계변수 및 목적함수의 정의

본 알고리즘은 유한 요소 해석에서 널리 사용되는 등매개변수 보간법을 이용하여 요소 내에서 변위와 위치가 보간되고 변위와 변형률의 관계식, 식 (5)과 (6)을 통해 변형률이 계산된다. 그리고 요소 절점의 평면에서 좌표가 최적점으로 이동하며 반복 계산이 수행된다.

따라서 설계변수는 곡면을 근사시킨 격자점, 즉 유한요소의 절점의 전개 평면에서의 2차원 좌표가 된다. 즉 Fig. 5의 (b)에서와 같이 임의 절점의 평면에서 좌표를  $(x_i, y_i)$ 라 하고 절점의 개수를  $p$ 개라 하면 설계변수  $x$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_p, y_1, y_2, \dots, y_p\} \quad (13)$$

설계변수는 총  $n = 2p$ 개가 된다. 즉 최적 설계의 차원은  $2p$ 이다.

목적 함수  $f(x)$ 는 식 (12)과 같이 표현되는 변형률

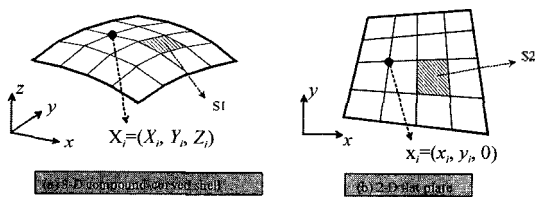


Fig. 5. Definition of Design Variables.

에너지로 정의된다.

$$E = \frac{1}{2} \int_{V_r} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV \quad (14)$$

식 (14)은 아래 식과 같이 요소별로 이산화시킬 수 있다.

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int_{V_i} \sigma_{pq}^i \epsilon_{pq}^i dV \quad (15)$$

여기서  $E_i$ 는 각 요소별 변형률 에너지이고  $V_i$ 는 각 요소별 부피를 의미한다.

$\sigma_{ij}$ 는 응력으로 본 논문에서는 판의 변형을 탄성 대변형으로 가정한다. 따라서 다음 식과 같이 변형률과 응력의 관계, 즉 재료의 선형 구성 방정식이 성립한다. 따라서 다음과 같이 변형률 에너지를 계산된다.

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^N E_i \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int_{V_i} \{ \sigma_{xx}^i \epsilon_{xx}^i + \sigma_{yy}^i \epsilon_{yy}^i + \sigma_{xy}^i \epsilon_{xy}^i \} dV \\ &= \frac{E_Y}{2(1-\nu^2)} \sum_{i=1}^N \int_{V_i} \{ (\epsilon_{xx}^i)^2 + (\epsilon_{yy}^i)^2 + 2\nu \epsilon_{xx}^i \epsilon_{yy}^i \\ &\quad + \frac{(1-\nu)}{2} (\gamma_{xy}^i)^2 \} dV \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $E_Y$ 는 탄성계수이고  $\nu$ 는 포아송비이다.

이제  $i$ 번째 요소의 변형률 에너지를 살펴보자.

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{E_Y}{2(1-\nu^2)} \int_{V_i} \left\{ (\epsilon_{xx}^i)^2 + (\epsilon_{yy}^i)^2 + 2\nu \epsilon_{xx}^i \epsilon_{yy}^i \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1-\nu)}{2} (\gamma_{xy}^i)^2 \right\} dV \end{aligned} \quad (17)$$

미소 부피  $dV$ 는  $dV = dx dy dz$ 로 표현되는데 Fig. 3의 지역 좌표계로 나타내면 야코비 행렬을 이용하여 다음처럼 표현이 된다.

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{E_Y}{2(1-\nu^2)} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \int_{-h/2}^{h/2} \{ (\epsilon_{xx}^i)^2 + (\epsilon_{yy}^i)^2 + 2\nu \epsilon_{xx}^i \epsilon_{yy}^i \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1-\nu)}{2} (\gamma_{xy}^i)^2 \} dz \right\} \det J dr ds \end{aligned} \quad (18)$$

여기서  $h$ 는 판의 두께이며, 야코비 행렬  $J$ 은 식 (10)과 (11)에 정의된 것과 같다. 식 (18)에서 두께 방향

z에 대해서 해석적으로 적분하고 지역 좌표  $r, s$ 에 대해서는 4점 가우스 적분(Gaussian quadrature)을 수행한다.

각 절점의 이동변위  $U_i = (u_i, v_i, w_i)$ 는 Fig. 5로부터 다음과 같이 정의되며,

$$U_i = X_i - x_i \\ = (X_i - x_i, Y_i - y_i, Z_i) \quad (19)$$

식 (7), (8)과 (9)에 식 (19)을 대입시켜보면 임의 요소 내부의 변위는  $x_i$ 와  $y_i$ 의 함수이고 야코비 행렬식도  $x_i$ 와  $y_i$ 의 함수이므로 변위와 변형률의 관계로부터 변형률은  $x_i$ 와  $y_i$ 의 함수임을 알 수 있다. 따라서  $E_i$ 는  $x_i$ 와  $y_i$ 의 함수라는 것을 알 수 있다. 즉 목적 함수를 표현하는 식 (16), 변형률 에너지  $E$ 은  $x_i$ 와  $y_i$ 의 함수이다.

3.2 제약 조건의 정의

지금까지 목적 함수를 정의하였다. 남은 것은 제약 조건을 정의하는 것이다. 제약 조건은 곡면의 가공 조건과 가공 과정을 고려하여 정의되어야 한다. 인장을 발생시켜 곡면을 가공하는 방법이 있는가 하면 수축을 유발시켜 곡면을 가공하는 방법이 있다.

본 논문에서 대상으로 하는 곡면 가공 방법은 선상 가열법 및 롤러에 의한 굽힘 가공법이다. 선상 가열은 강재에 열을 가함으로써 국부적인 수축을 발생시켜 곡면을 가공하게 된다. 그리고 롤러에 의한 굽힘 가공은 곡률이 심하지 않은 경우에 강재의 크기에 거의 변화가 없다. 실제로 조선소에서 선상 가열에 의한 수축 마진을 전개된 형상에 추가하게 되지만 롤러에 의한 굽힘 가공을 위한 마진은 곡률이 심한 경우를 제외하고 추가되지 않는다. 따라서 초기 평판 형상의 크기가 목적 곡면의 크기보다 크게 전개되어야 한다. 다른 가공법에 대한 제약 조건도 마찬가지로 그 역학적 특성을 고려하여 정의될 수 있다.

역학적으로, 물체의 크기의 변화는 변형률로 측정된다. 예를 들어 단순히 봉(bar)에 대해 변형률은 원래 길이에 대해 길이의 변화량의 비로 정의되는데 봉의 길이가 줄어드는 경우 변형률의 정의로부터 음(-)의 값을 갖게 된다. 본 논문에서 제안한 판의 비선형 변형기하해석을 통해 변위와 변형률의 관계를 정의하였으며 정의된 전체 변형률  $\epsilon$ 은 굽힘 변형률  $\epsilon^b$ 와 면내 변형률  $\epsilon^m$ 로 분해하였다. 면내 변형률  $\epsilon^m$ 은 임의 지점에서 판의 두께 방향에 따라 동일한 값을 가지며 굽힘 변형률  $\epsilon^b$ 은 판의 두께 방향에 따라 선형적으로 변한다. 판의 중앙면에서 굽힘 변형률은 '0'이다.

본 논문에서는 판의 크기의 변화에 대한 척도로 판

의 중앙면에서 측정되는 변형률, 즉 면내 변형률을 선정한다. 변형률 측정이 판의 두께 방향에 대해 어느 위치에서 이루어지느냐에 따라 변형률의 부호가 달라지는데 대체로 가열이 수행되는 면과 중앙면에서 변형률이 음(-)의 부호를 가지며 가열이 이루어지지 않는 면은 양(+)의 변형률을 갖는다. 이것은 목적하는 곡면의 곡률에 기인하게 되는데, 판의 중앙면에서 측정되는 변형률은 굽힘 변형률이 '0'이 되기 때문에 곡률의 영향을 받지 않고 판의 변형의 척도로 사용될 수 있다. 판의 굽힘 변형에 대한 효과는 식 (5)에 보이는 것과 같이 판의 변형률에 포함되어 계산된다.

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

$$\epsilon_2^m < \epsilon_1^m < 0 \quad (20)$$

면내 변형률에 대한 제약 조건은 제 1 면내 변형률에 대해

$$\epsilon_1^m < 0 \quad (21)$$

으로 정의된다. 이것을 Mohr's Circle을 이용하여 면내 변형률의 성분,  $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \gamma_{xy}$ 으로 표현하면,

$$\epsilon_1^m = \left( \frac{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}}{2} \right) + \sqrt{\left( \frac{\gamma_{xy}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}}{2} \right)^2} \quad (22)$$

이 얻어진다.

그러나 이 제약 조건을 판의 모든 위치에 부여한다는 것은 불가능하다. 유한 요소로 분할된 판에서 각 요소별로 각 요소의 전체에 걸친 제 1 주 면내 변형률,  $\epsilon_1^m$ 의 적분에 제약 조건을 부여한다.

$$IS = \iint_{A_0} \epsilon_1^m dA = \iint_{A_0} \epsilon_1^m dx dy \\ \equiv \sum_{i=1}^N \iint_{A_i} \epsilon_1^m \det J dr ds \\ < 0 \quad (23)$$

여기서 IS는 제 1 주 면내 변형률의 적분값을 나타낸다. 앞서 언급하였듯이 판의 전체에 정의된 제약 조건을 각 유한 요소별로 분배하면,

$$IS_i = \iint_{A_i} \epsilon_i^n \det J \, dr ds < 0 \quad (24)$$

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

그리고 본 논문에서 제안하는 최적 전개 알고리즘은 유한 요소를 이용한 형상 최적화 문제의 일종이므로 각 절점의 위치에 대한 제약조건이 주어져야 한다. 즉 반복 계산 단계에서 4절점 유한 요소가 형상의 볼록성(Convexity)을 유지하며 정의될 수 있도록 하기 위해서 왜곡 판별 인자(Distortion Parameter, DP)를 정의한다.

$$DP = \frac{4(\det J_{\min})_i}{A_i} \quad (25)$$

$(\det J_{\min})_i$ 은  $i$ 번째 요소 내에서 계산되는 야코비 행렬식의 최소값이고  $A_i$ 는  $i$ 번째 요소의 면적이다. 4절점 사각요소에 대해서 DP는 다시 다음처럼 정의될 수 있다.

$$DP = \frac{4(\min(DJ_k))_i}{A_i} \quad (26)$$

$DJ_k(k = 1, 2, 3, 4)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} DJ_1 &= \frac{(x_{21}y_{41} - x_{41}y_{21})}{4} \\ DJ_2 &= \frac{(x_{32}y_{12} - x_{12}y_{32})}{4} \\ DJ_3 &= \frac{(x_{43}y_{23} - x_{23}y_{43})}{4} \\ DJ_4 &= \frac{(x_{14}y_{34} - x_{34}y_{14})}{4} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서  $x_{ij} = x_i - x_j$ 이고  $y_{ij} = y_i - y_j$ 이며,  $(x_i, y_i)$ 는 Fig. 5에서 각 절점의 좌표이다.

$DP > 0$ 이면 요소가 볼록성을 유지하지만 그렇지 않으면 삼각형이 되거나 오목한 형상으로 변하므로 4절점 사각 요소로서 작동을 하지 못한다. Fig. 6를 보면 쉽게 알 수 있다. 따라서 각 요소의 왜곡 판별 변수  $DP_i$

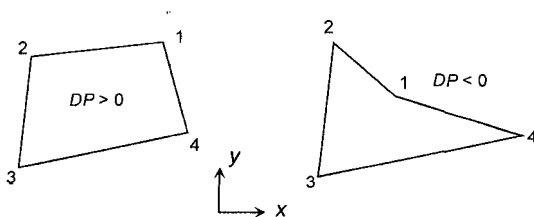


Fig. 6. Distortion parameter DP4 for 4-node plate element.

에 대해 다음과 같은 제약 조건이 부여된다.

$$DP_i > 0, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (28)$$

그러나 왜곡 판별 인자  $DP_i$ 를 제약 조건으로 부여하게 되면 제약 조건식의 수가 늘어나게 되어 계산 성능에 좋지 못한 영향을 끼치게 된다 따라서 본 논문에서는 별도로 제약조건으로 부여하지 않고 SQP에서 각 반복계산 단계에서 진행 크기를 모니터링함으로써 이 제약 조건을 만족시킬 수 있도록 하였다.

이상으로 최적 근사 전개 알고리즘의 목적 함수와 제약 조건을 살펴보았다. SQP는 각 식들의 미분을 필요로 한다. 앞서 정식화된 식들은 설계변수들에 대해서 쉽게 미분값을 구할 수 있는 것이 아니다. 그러나 유한요소의 기본 특성을 이용하면 수치 미분을 이용하지 않고 해석적으로 미분값을 유도할 수 있다.

#### 4. 제안된 알고리즘의 계산 예

지금까지 본 논문에서 제안한 변형률 에너지를 기반으로 하는 최적 전개 과정을 살펴보았다. 본 장에서 다양한 곡면에 이 전개 알고리즘을 적용하여 그 결과를 검토해 보고자 한다. 먼저 전형적인 곡면에 최적화의 결과 및 성능을 검토한다. 실제 조선소에서 사용되는 선체 곡면에 대해 본 전개 알고리즘을 적용하여 볼 것이다. 예제에는 곡면이 분류될 수 있는 세 가지 형태, 즉 양의 가우스 곡률을 갖는 볼록 곡면, 음의 가우스 곡률을 갖는 안장형 곡면, 가우스 곡률이 '0'인 실린더형 곡면이 포함되며, 일부 예제에서는 양의 값과 음의 값의 가우스 곡률을 모두 가지는 복잡한 곡면이 포함될 것이다. 본 논문에서 사용되는 예제는 Pentium III - 500 MHz, RAM 392 MB의 성능을 가진 PC로 계산되었다.

##### 4.1 전형적인 곡면에 대한 결과

###### 4.1.1 볼록 곡면(Convex Surface)의 전개

Fig. 7과 Fig. 8은 볼록 곡면에 대한 목적 곡면의 형상과 전개된 형상 및 주 면내 변형률의 분포를 보여주고 있다. 이 결과는 요소수가  $(13 \times 13)$ 인 모델을 대표로 하고 있다. 본 알고리즘에 포함된 변형 이론을 통해서 원하는 곡면을 가공하기 위한 변형률의 크기 및 방향을 쉽게 판단할 수 있다.

Table 1은 요소수의 변화에 따른 목적 함수, 반복 계산 회수, 계산 시간 등을 보여주고 있다. Table 1을 보면 목적 함수, 즉 변형률 에너지가 수렴하고 있음을 볼 수 있으며 적은 수의 요소에서도 비교적 정확한 값을



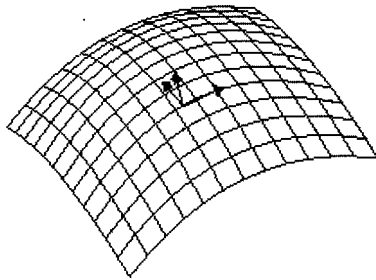


Fig. 7. The Convex Surface

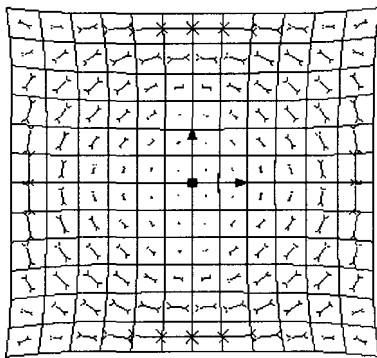


Fig. 8. Planar Development and Principal Strain Distribution in Convex Surface.

Table 1. Objective Function And CPU Time along the number of Meshes in Convex Surface

요소수	목적 함수값	반복 계산회수	계산시간(초)
7	23.813	57	1.187
9	22.931	79	4.469
11	22.493	93	13.953
13	22.209	110	47.125
15	22.063	133	155.375
17	21.956	135	335.219

Table 2. Edge Length along the number of Meshes in Convex Surface

요소수	목적곡면		전개 형상	
	Edge1	Edge2	Edge1	Edge2
7	108.5	103.193	115.576	108.779
9	108.591	103.231	115.666	108.816
11	108.633	103.248	115.759	108.85
13	108.656	103.257	115.763	108.867
15	108.67	103.263	115.781	108.861
17	108.679	103.267	115.791	108.874

가지고 있음을 볼 수 있다.

Table 2는 요소의 수에 따른 모서리의 길이의 변화 및 목적 형상과의 길이 차를 보여주고 있다. 상하 좌우 대칭이기 때문에 두 모서리의 길이만을 나타냈다. 표를 보면 알 수 있듯이 적은 수의 요소에서 전개 형상의 모서리의 길이가 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 변형을 분포와 더불어 전개 형상의 길이가 목적 형상의 길이보다 길게 나오는 것으로 곡면 성형 방법에 부합하는 결과를 제공함을 알 수 있다.

#### 4.1.2 안장형 곡면(Saddle Surface)의 전개

Fig. 9과 Fig. 10은 안장형 곡면에 대한 목적 곡면의 형상과 전개된 형상 및 주 면내 변형률의 분포를 보여주고 있다. 이 결과는 요소수가 (13×13)인 모델을 대표로 하고 있다.

Table 3은 요소수의 변화에 따른 목적 함수, 반복 계산 회수, 계산 시간 등을 보여주고 있다. Table 3을 보면 목적 함수, 즉 변형을 에너지가 수렴하고 있음을 볼 수 있으며 적은 수의 요소에서도 비교적 정확한 값을

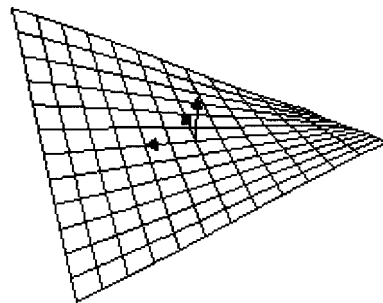


Fig. 9. The Saddle Surface.

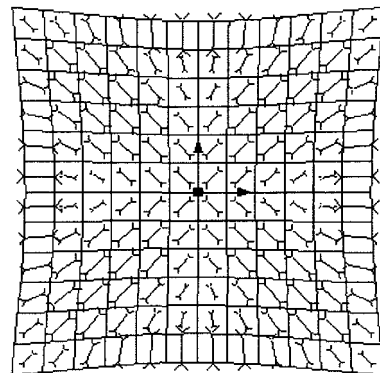
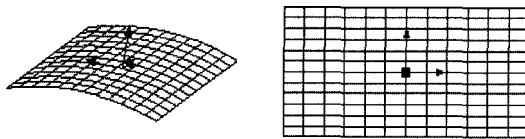


Fig. 10. Planar Development and Principal Strain Distribution in Saddle Surface.

**Table 3.** Objective Function and CPU Time along the number of Meshes in Saddle Surface

요소수	목적 함수값	반복 계산회수	계산시간(초)
7	5.016	41	1.016
9	4.760	68	4.672
11	4.623	101	18.000
13	4.545	87	44.297
15	4.505	107	152.328
17	4.480	122	350.750



(a) The NURBS Surface (b) The Planar Development  
**Fig. 11.** The Cylindrical Surface.

**Table 4.** Objective Function and CPU Time along the number of Meshes in Cylindrical Surface

요소수	목적 함수값	반복 계산회수	계산시간(초)
7	5.220E-16	43	1.422
9	3.344E-17	144	16.469
11	2.548E-17	285	86.422
13	1.262E-16	180	162.593

**Table 5.** Edge Length along the number of Meshes in Cylindrical Surface

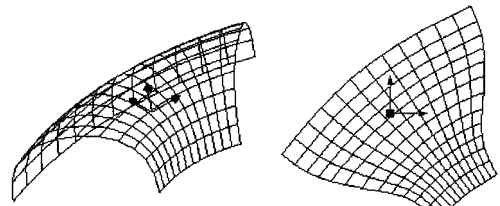
요소수	목적곡면		전개 형상	
	Edge1	Edge2	Edge1	Edge2
7	240	111.706	240	111.706
9	240	111.706	240	111.706
11	240	111.706	240	111.706
13	240	111.706	240	111.706

가지고 있음을 볼 수 있다.

**4.1.3 실린더형 곡면의 전개**

이 예제는 실린더 형 곡면의 전개이다. 이 예제는 본 논문에서 제시한 알고리즘이 정확한지를 알 수 있는 한 예인데, 이 곡면은 전개 가능한 단순 곡면이므로 목적함수의 값이 '0'의 값을 가져야한다. 그리고 각 모서리의 길이가 목적 형상과 전개 형상에서 동일해야한다.

Table 4에서 목적함수의 값이 거의 '0'에 가까운 값을 가짐을 확인할 수 있고 Table 5에서 각 변의 길이



(a) The NURBS Surface (b) The Planar Development  
**Fig. 12.** The Part of Torus.

**Table 6.** Objective Function and CPU Time along the number of Meshes in Torus Surface

요소수	목적 함수값	반복 계산회수	계산시간(초)
7	9.704	226	5.891
9	9.274	277	22.843
11	9.021	380	83.000
13	8.877	406	254.89
15	8.795	433	742.093
17	8.734	625	2339.281

가 서로 같음을 알 수 있다. 따라서 본 알고리즘은 단순 곡면 및 이중 곡면에 모두 적용될 수 있다.

**4.1.4 기타 복잡한 곡면의 전개**

이 예제는 도너츠(Torus)의 한 부분을 모델링한 것으로 한 곡면에 두 가지 곡면의 특성, 즉 양의 가우스 곡률과 음의 가우스 곡률을 모두 가지고 있다. 이러한 곡면을 성형하는 것은 드물지만 본 알고리즘의 성능을 검토하기에는 적절한 예라고 할 수 있다.

다른 예에 비해서 반복계산 회수가 많아져 계산 시간이 늘어나는 것을 볼 수 있으나 적은 수의 요소에서도 비교적 정확한 결과를 제공하는 본 알고리즘을 고려해 본다면 요소의 수를 줄이면 비싼 계산 시간을 들이지 않고서도 전개 형상을 획득할 수 있다

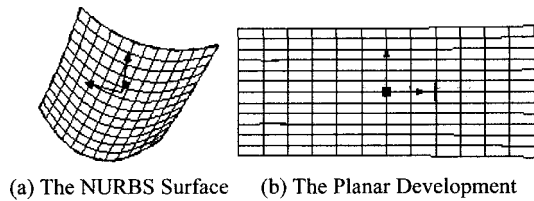
지금까지 4개의 예제를 통해서 본 알고리즘의 결과 및 효율성을 검토해 보았다. 이 예제들은 제조분야에서 사용되는 곡면에 비해 과도한 곡률을 가진 것들이지만 본 알고리즘을 통해 좋은 결과를 가지고 자동 전개를 수행할 수 있음을 보여주었다.

**4.2 여러 가지 선체 곡면에 대한 결과**

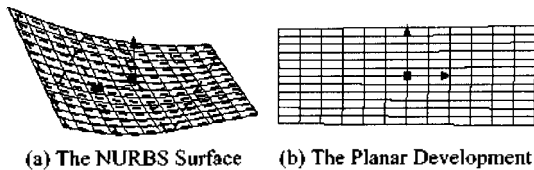
이 절에서는 실제 선박 설계에서 발생하는 선체 곡면들에 대해 본 알고리즘을 적용하여 보겠다. 특히 쉽게 전개되지 않는 곡면으로 알려져 있는 Fashion plate, K-plate, A-plate 등에 적용하여 그 결과를 살펴

**Table 7.** Objective Function and CPU Time along the number of Meshes in Fashion Plate

요소수	목적 함수값	반복 계산회수	계산시간(초)
7	9.011	87	1.672
9	8.208	123	6.797
11	7.775	148	22.781
13	7.540	179	68.312
15	7.386	218	232.922
17	7.289	230	543.453



**Fig. 13.** The Fashion Plate.



**Fig. 14.** The K-Plate.

**Table 8.** Value of Objective Function and CPU Time along the number of Meshes in K-Plate

요소수	목적 함수값	반복 계산회수	계산시간(초)
7	0.897	123	2.797
9	0.342	174	12.57
11	0.177	220	43.344
13	0.113	249	140.500
15	0.00837	406	724.297
17	0.00683	810	3238.704

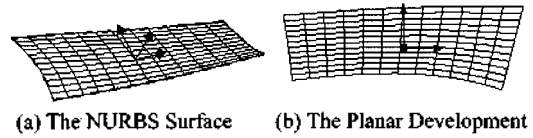
보도록 한다.

**4.2.1 Fashion Plate**

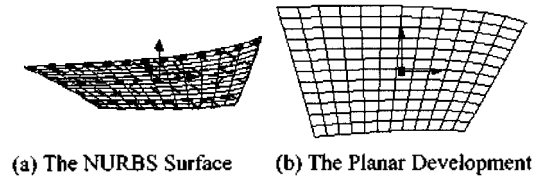
이 예제는 선체의 선수부 정면에 위치하는 곡면이다. 이것은 전형적인 블록 곡면과 동일한 예제라고 볼 수 있다.

**4.2.2 K-Plate**

이 예제는 선체에서 bottom tangent line에 걸쳐 있



**Fig. 15.** The Part of Stern.



**Fig. 16.** The A-Plate of Bow.

는 곡면으로 평면과 이중곡면을 함께 가지고 있다. 이 곡면을 평면인 부분을 고려하여 자동으로 전개하는 것은 쉽지 않으며 본 알고리즘을 통해서 쉽게 자동 전개를 수행할 수 있다.

Fig. 15와 Fig. 16은 선체의 선미부와 A-Plate 대한 전개 예를 보여주고 있다. 이 예에 대해서는 계산 결과를 생략하고 단지 전개 형상만을 보여준다.

**5. 결 론**

이중 곡면의 성형 과정의 시작은 그 곡면의 전개 형상을 획득하는 것이다. 이중 곡면은 전개불가능한 곡면이기 때문에 전개 형상의 정확성을 언급한다는 것이 모순일 수 있다. 그러나 성형방법을 고려하고 최소의 압축 및 인장을 요구하는 전개 형상이 비교적 정확하다고 주장하는 것은 무리가 아니다.

본 논문에서 성형방법을 고려하고 최소의 압축 및 인장을 요구하는 전개 형상을 획득할 수 있는 최적 근사 전개 알고리즘을 제안하였다. 먼저 변형이론을 소개하고 그 변형이론을 기반으로 변형을 에너지가 최소가 되도록 하는 최적 전개 알고리즘을 정식화하여 알고리즘의 효용성을 여러 가지 곡면에 대한 적용 예를 통해 다음과 같이 검토하였다.

1. 목적 곡면이 주어지면 추가 작업이 없이 자동 전개가 가능하다.
2. 곡면의 성형과정에서 발생하는 역학적 물리량을 가지고 정식화되어 그 성형법에 부합하는 가공 정보를 제공할 수 있다.
3. 현재 수작업을 통해서 이루어지는 복잡한 곡면을 자동 전개로 대체할 수 있다.

**감사의 글**

본 논문은 서울대학교 두뇌한국 21사업 대학교육개혁지원비의 지원과 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행된 연구 결과임을 밝힌다.

**참고문헌**

1. Hinds, B. K., McCartney, J. and Woods, G., "Pattern development for 3D surfaces," *Computer-aided Design*, Vol. 23 No. 8, pp. 583-592, 1991
2. Clements, J. C., "A Computer System to Derive Developable Hull Surfaces and Tables of Offsets," *Marine Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 227-235, 1981.
3. Clements, J. C., "Developed Plate Expansion Using Geodesics," *Marine Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 384-388, 1984.
4. 윤대규, 신종계, 류철호, "최소 2차 가공을 위한 이중 곡면의 롤러 굽힘 형상 결정", 대한조선학회 논문집, 제36권, 제3호, pp. 135-144, 1999.
5. Yang, H., and Luo, B.Q., "A New Method of Developing Shells with High Precision," *Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design VI*, pp. 233-245, 1988.
6. Letcher, J. S., "Lofting and Fabrication of Compound-Curved Plates", *Journal of Ship Production*, Vol. 37, No. 2, pp. 166-175, 1991.
7. Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R. A., Neki, I., Kamachika, R., Ishiyama, M. and Ogawa, J., "Development of Computer Aided Process for Plate Bending by Line Heating (Report I) - Relation Between the Final Form of the Plate and the Inherent Strain," *Journal of Ship Production*, Vol. 10, No. 1, pp. 59-67, 1994.
8. Manning, J. R., "Computerized pattern cutting," *Computer-Aided Design*, Vol. 12, No. 1, pp. 43-47, 1980.

9. Shimada, T. and Tada, Y., "Development of Curved Surface using Finite Element Method," *Proceedings of the first International Conference on Computer Aided Optimum Design of Structures*, Southampton, UK, pp. 23-30, 1989.
10. Shimada, T. and Tada, Y., "Approximate Transformation of an Arbitrary Curved Surface into a Plane Using Dynamic Programming," *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 2, pp. 153-159, 1991.
11. Tribon User's Guide, "Shell Plate Development," Hull Curved Modeling, Section III, Kockums company, 1997.
12. Randrup, T., "Approximation of surfaces by cylinders," *Computer-aided Design*, Vol. 30 No. 10, pp. 807-812, 1998.
13. 김유일, 신종계, 이장현, "Roll bending machine에 의한 선체의판의 곡면가공해석" 대한조선학회 논문집, 제33권, 제4호, pp. 142-149, 1996.
14. Yu, G., Patrikalakis, N. M. and Maekawa, T., "Optimal Development of Doubly Curved Surfaces," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 17., pp. 547-577, 2000.
15. Malvern, L. E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1969.
16. 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.
17. Lee, J. H., "Relations between Input Parameters and Residual Deformations in Line Heating Process Using Finite Element Method and Multi-Variate Analysis," Ph.D. Thesis, Dept. of National Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, 1999.
18. Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1996.



**유 철 호**

1996년 서울대학교 조선해양공학과 학사  
 1998년 서울대학교 조선해양공학과 석사  
 1998년~서울대학교 조선해양공학과 박사과정  
 관심분야: 선박생산공학, Digital Shipbuilding, 곡면가공



**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~ 디지털선박신기술센터(Digital Shipbuilding Innovation Center) 대표  
 관심분야: Digital Shipbuilding, 선박 생산 시스템