

선박 외판 성형에서 목적 형상과 전개 평판의 최적 정합을 위한 ICP(Iterative Closest Point) 알고리즘 적용

이장현*, 윤종성**, 류철호***, 이황범**

Application of ICP(Iterative Closest Point) Algorithm for Optimized Registration of Object Surface and Unfolding Surface in Ship-Hull Plate Forming

Jang Hyun Lee*, Jong Sung Yoon**, Cheolho Ryu*** and Hwang Beom Lee**

ABSTRACT

Generally, curved surfaces of ship hull are deformed by flame bending (line heating), multi-press forming, and die-less forming method. The forming methods generate the required in-plane/bending strain or displacement on the flat plate to make the curved surface. Multi-press forming imposes the forced displacements on the flat plate by controlling the position of each pressing points based upon the shape difference between the unfolded flat plate and the curved object shape. The flat plate has been obtained from the unfolding system that is independent of the ship CAD. Apparently, the curved surface and the unfolded-flat surface are expressed by different coordinate systems. Therefore, one of the issues is to find a registration of the unfolded surface and the curved shape for the purpose of minimum amount of forming works by comparing the two surfaces. This paper presents an efficient algorithm to get an optimized registration of two different surfaces in the multi-press forming of ship hull plate forming. The algorithm is based upon the ICP (Iterative Closest Point) algorithm. The algorithm consists of two iterative procedures including a transformation matrix and the closest points to minimize the distance between the unfolded surface and curved surfaces. Thereby the algorithm allows the minimized forming works in ship-hull forming.

Key words : Multi-press Forming, Unfolded Surface, ICP Algorithm, Surface Matching, Surface Registration

1. 서 론

선박은 선형(hull form) 설계를 가지면서 외판 전체를 곡면으로 정의한다. 선박은 블록 조립 공법을 이용하여 건조하므로 선박 전체를 블록으로 분할한다. 블록 분할 과정에서 선형을 정의한 외판은 약 300여 개 내외의 곡면으로 쪼개진다. 이 곡면은 선상 가열 또는 다점 프레스, 무금형 프레스와 같은 가공 방법을 이용하여 성형함으로써 생산한다¹⁾. 따라서, 3차원 곡면으

로 정의된 선체 외판의 목적 형상을 성형 가공하기 위해서는 목적 곡면 형상과 대응되는 2차원 전개(unfolding) 형상을 계산하여야 한다²⁾. 선체 외판의 목적형상은 조선 CAD 시스템을 이용하여 경계선과 내부 점으로 구별된 점 좌표 또는 곡면의 wire frame 정보로 추출할 수 있으나, 목적형상에 대응되는 전개형상은 별도의 외판 전개 전용 소프트웨어를 이용하여 수행하는 경우가 많다. 각 성형 가공 방법은 2차원 전개 형상과 목적 형상의 변위 차이 또는 면내 변형률과 굽힘 변형률을 비교함으로써 가열선의 위치, 굽힘 가공 위치, 굽힘 가공량 정보를 산출하여 성형 가공을 수행한다³⁾.

본 논문은 여러 선체 외판 가공법 중에서 다점 프레스 방법을 적용하는 것을 가정하였다. 다점 프레스

*교신저자, 중신회원, 인하대학교 선박해양공학과

**학생회원, 인하대학교 대학원 선박공학과

***성회원, 인하공업전문대학 선박해양시스템과

- 논문부고일: 2008. 06. 17

- 논문수정일: 2009. 01. 07

- 심사완료일: 2009. 01. 30

방법은 다수의 프레스를 이용하여 전개 형상에 강제 변위 하중을 가하여 탄소성 변형을 통하여 복적하는 곡면을 가공한다. 그러나, 다점 프레스는 탄소성 변형을 이용하므로 spring-back이 발생할 수 밖에 없으므로, 탄성 변형량을 고려하여 가공 중인 판의 형상과 목적 형상을 비교하여 보상된 가공량, 즉 각 프레스의 강제 변위를 다시 추출하여야 한다⁶⁾. 또한, 전개 평판과 목적 곡면의 변위 차이를 비교하여, 목적 형상에 도달하기 위해 필요한 프레스의 변위 정보를 산출한다. 이 과정에서 선체 CAD에서 정의된 선체 외판 형상은 기준 좌표계를 바탕으로 임의의 3차원 공간에 정의되며 전개형상 또한 임의의 2차원 평면에 정의된다. 또한 가공 중인 부재의 형상은 가공 시의 기준 좌표계를 기준으로 정의된다. 따라서 전개 평판과 복적 곡면의 좌표계를 일치시킬 수 있어야 하며, 판의 각 꼭지점에서 두 형상 사이의 변위 차가 적절하게 배분되고, 중앙부에서 두 곡면이 한 점에서 접하도록 정합 배치하여야 한다.

Fig. 1은 다점 프레스를 이용한 선체 외판 곡면 가공의 개념적인 모습을 나타내고 있다. 점으로 표현된 위치는 평판에서 프레스 가공 위치이고, 점선 화살표는 전개된 평판에서 가해지는 프레스 강제 변위를 의미하며, 곡면 형상은 목적형상을 의미한다.

다점 프레스를 이용한 가공법은 포함하여 선체의 대형 후판의 곡면 성형법은 점진적 성형법(Incremental forming method)의 하나로, 여러 번의 반복 성형 가공을 거쳐서 목적형상에 수렴하는 것으로 매 단계마다 성형 정보를 산출하기 위해서 선체 외판의 목적 형상과 전개 및 가공 중인 형상과의 정합 및 비교는 필요한 요소 기술에 해당한다.

두 곡면의 정합 및 비교를 위한 알고리즘으로 ICP (Iterative Closest Point) 알고리즘이 널리 사용되는데, 이것은 근접한 두 곡면의 정합에 적합하다고 알려져 있다^{6,7)}. 그러나 선체 외판 곡면 성형은 초기 전개 형상과 목적 형상에 대해 이러한 조건을 만족시키지 못하거 점진적으로 가공이 진행되면서 이 조건을 만족

시키게 된다. 본 연구에서는 다점 프레스 가공법에 의한 곡면 성형에 두 곡면의 정합을 위한 ICP 알고리즘을 적용함에 있어서, 특히 전개 형상과 목적 형상 사이의 정합성을 평가하여 그 적용 가능성을 평가하고자 한다.

2. 관련 연구

각기 다른 좌표 계를 기준으로 생성된 두 개의 형상데이터를 하나의 좌표 계로 일치시킴과 동시에 가장 근사한 곡면으로 정렬하는 과정을 통상 정합(Registration)으로 정의한다. 본 논문에서는 다른 좌표계를 기준으로 생성된 전개 평판과 목적 곡면 데이터를 하나의 좌표 계로 정합시키기 위한 방법으로 ICP (Iterative Closest Point) 알고리즘을 사용하였으며, 반복 계산과정 중 두 곡면 사이에 대응점을 찾기 위하여 최근접 탐색 기법을 혼용하였다.

Horn⁸⁾은 서로 다른 좌표 계로 표현된 두 개의 곡면데이터 집합 사이의 관계를 찾아서, 복소수의 확장인 단위 쿼터니온(Quaternion)을 두 좌표계의 정합 문제에 적용하였다. 또한, Besl과 McKay는 Horn이 제안한 방법을 기초로 ICP 알고리즘을 제안하였다⁹⁾. 제안된 ICP 알고리즘은 3차원 데이터들의 정합을 위해서 다른 좌표 계로 표현된 두 개의 데이터 집합간의 변환행렬을 계산하여 한 개의 데이터 집합을 다른 한 개의 데이터 집합으로 변환하고 두 데이터 집합 간의 거리 오차가 최소가 되도록 반복하는 알고리즘이다.

ICP 알고리즘은 두 데이터 집합 간의 대응관계를 모르는 상황에서 사용이 가능한 알고리즘으로 3차원 데이터의 정합을 위해 널리 사용되고 있다. 대부분의 연구에서 유사한 기하학적 형상을 가지는 두 데이터 집합 간의 관계를 찾아 정합시키는 목적으로 ICP 알고리즘을 사용하였다¹⁰⁾. 그러나 본 논문에서는 전개형상과 목적곡면이라는 다른 기하학적 형상을 가지는 데이터의 정합을 위해 ICP 알고리즘을 적용하였다. 현재까지 널리 이용되어온 ICP 알고리즘이 반복적으로 두 곡면의 오차를 반드시 산정해야 하는 선체 외판 가공 공정에서 어떻게 활용될 수 있을지 평가할 수 있을 것이다. ICP 알고리즘은 크게 두 부분으로 구성되며, 두 데이터 집합간의 변환행렬(T)을 계산하는 과정과 변환행렬을 적용하여 변환된 하나의 데이터 집합에 대응하는 점을 나머지 데이터 집합으로 표현된 매개 변수 곡면에서 찾는 과정으로 나눌 수 있다. 전개형상과 목적곡면 데이터의 경우에는 두 개의 곡면 데이터 형상이 매우 상이하므로 최근접(closest point) 탐색 방

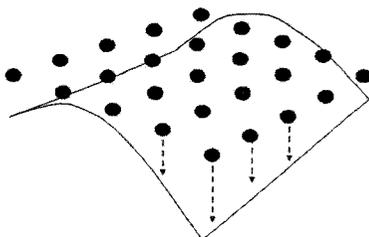


Fig. 1. Schematic feature of multi-point forming.

법을 이용하여 기준 곡면 상의 점으로부터 최소 거리를 가지는 비교곡면 상의 점들을 대응점으로 계산하였다. 이는 최소 가공 양을 결정하기 위한 방법으로 사용하였다.

3. ICP 알고리즘 적용

3.1 선체 외관 곡면 정보의 흐름

선체 외관 가공을 위한 곡면 정보를 산출하는 흐름은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 선박의 3차원 모델링 정보로부터 각각의 외관 정보를 추출(trimming)한 후 이 곡면을 전개시켜서 목적 곡면에 해당하는 전개 평면의 외곽선 형상을 계산한다. 전개 평면 데이터로부터 프레스의 위치 정보를 추출하여야 한다. 본 논문에서는 다점 프레스의 개수를 25개로 가정하였으며, 각각의 프레스는 전개 평면의 경계선을 따라 16개, 평면 내부에 9개를 등 간격으로 분포시켜 생성하는 것으로 가정하였다. 또한, ICP 알고리즘에서는 두 곡면 데이터의 수가 같아야 하므로 프레스 위치에 대응하는 목적 곡면 상의 점 좌표 25개를 계산하였다.

산출된 프레스 위치 데이터와 목적 곡면 데이터는 각각 다른 좌표 계 시스템을 기준으로 생성되어 있다.

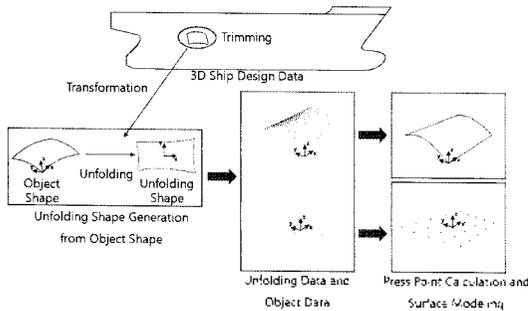


Fig. 2. Process for surface data generation in hull piece design.

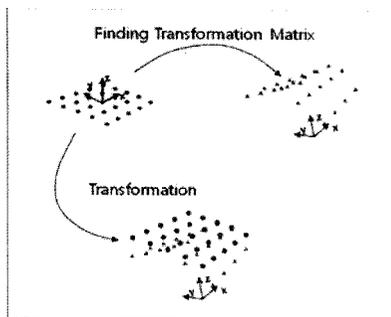


Fig. 3. Integration of coordinate system.

므로 Fig. 3에 보인 것과 같이 전개 곡면 데이터에서 계산한 프레스 위치 데이터로부터 목적 곡면 데이터로의 변환행렬을 계산한다. 그리고 계산된 변환행렬을 프레스 위치 데이터에 적용하여 프레스 위치 데이터를 목적 곡면 데이터의 좌표계로 변환시킨다. 변환된 프레스 위치 데이터에 대응하는 목적 곡면 상의 점을 찾아야 한다. 대응 점은 목적 곡면 데이터로부터 곡면 정보를 모델링 한 후에 각각의 프레스 위치 상의 점에 대응하는 목적 곡면상의 대응점을 찾으려 하였다. 반복 계산을 하는 동안 전개 곡면 상의 점과 목적 곡면 상의 대응점의 거리의 제곱의 합의 변화가 허용치 안에서 있으면 반복 계산을 종료하고 최종 정합으로 결정하였다. Fig. 4는 ICP 알고리즘을 이용하여 두 곡면의 점 좌표를 동일한 좌표계로 정합하는 과정을 설명하고 있다.

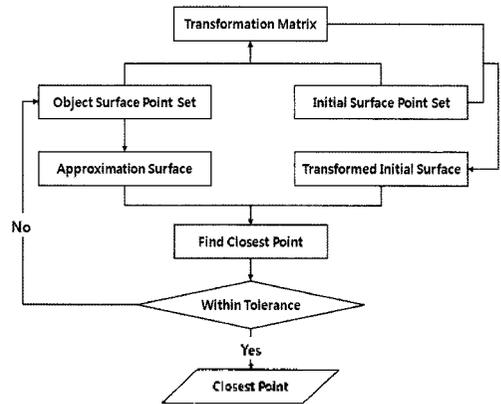


Fig. 4. General process of ICP algorithm.

3.2 곡면 모델링

ICP 알고리즘에서 변환된 프레스 위치 데이터에 대응하는 목적 곡면 상의 대응점을 찾으려면, 목적 곡면의 곡면식이 정의되어야 한다. 목적 형상의 정보는 선체 CAD인 TRIBONTM으로부터 와이어프레임, 주 선과 곡선의 집합으로 얻어내며, 목적 형상의 전개 정보는 외관 전개 방법을 이용하여 얻게 된다.

따라서 점 및 곡선으로 정의된 목적 형상은 다항식이나 Spline, Bezier, Nurbs 등과 같은 매개 변수를 이용한 곡면으로 표현이 되어야 하는데, 본 논문에서는 계산의 편의성을 위해 곡면 형상을 다항식 근사 방법을 이용하여 표현하였다. 대부분의 선체 외관이 곡률 변화가 심하지 않다고 가정하고, 다항식을 이용하여 곡면 정보를 정의하였다. 목적 곡면의 점 좌표 (x, y, z) 는 (x, y) 를 매개 변수로 가지는 3차의 다항식으로 표현하여 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 z = f(x, y) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{ij} x^{i-1} y^{j-1} \\
 &= (C_{11} + C_{12}y + C_{13}y^2 + C_{14}y^3) + x(C_{21} + C_{22}y + C_{23}y^2 + C_{24}y^3) \\
 &\quad - x^2(C_{31} + C_{32}y + C_{33}y^2 + C_{34}y^3) + x^3(C_{41} + C_{42}y + C_{43}y^2 + C_{44}y^3) \\
 &= ax^3 + bx^3y + cx^3y^2 + dx^3y^3 + ex^2 + fx^2y + gx^2y^2 \\
 &\quad + hx^2y^3 + ix + jxy + kxy^2 + lxy^3 + my + ny^2 + oy^3 + p \quad (1)
 \end{aligned}$$

따라서, N 개의 목적 곡면 위의 점 좌표를 이용하여 식 (1)을 행렬식의 형태로 표시하면 식 (2) 및 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 목적 곡면 위의 점 좌표는 주어진 점과 곡선(원호)의 집합으로부터 계산되고, 목적 곡면의 근사를 위해 xy 평면에 투영했을 때 겹치지 않도록 적절히 변환이 되어야 한다.

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_1^3 y & \dots & 1 \\ x_2 & x_2^3 y & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & x_N^3 y & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ \vdots \\ p \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{B} \quad (3)$$

식 (3)의 행렬식에서 우변의 \mathbf{M} 은 매개 변수 x, y 로 표현되며, \mathbf{B} 는 다항식의 계수이다. 목적 곡면을 대표하는 N 개의 점 좌표로부터 \mathbf{Z} 와 \mathbf{M} 을 계산하고 미지의 다항식 계수 \mathbf{B} 를 계산할 수 있다. 따라서 식 (1)에 나타난 바와 같이 다항식 계수와 매개 변수 x, y 를 이용하여 3차 근사 다항식 곡면을 생성할 수 있다.

3.3 ICP 알고리즘

ICP 알고리즘은 같은 개수의 점 데이터인 프레스 위치 데이터와 목적 곡면 데이터 사이의 변환 관계를 찾아서 두 데이터 집합간의 변환행렬(\mathbf{T})을 계산하는 과정과 변환된 프레스 위치에 대응하는 목적 곡면상의 대응점을 찾는 과정으로 나눌 수 있다^[6,8].

프레스 위치 데이터와 목적 곡면의 데이터의 개수는 각각 N 개이고, 프레스의 점들의 집합을 $\mathbf{P} = \{\vec{p}_i\}$ 라 하고, 목적 곡면을 이루는 점 데이터 N_i 개의 집합을 $\mathbf{X} = \{\vec{x}_i\}$ 이라고 가정한다.

두 위치 데이터 집합간의 거리 오차의 제곱의 합을 나타내는 목적 함수는 식 (4)와 같으며 목적 함수의 변화량이 정해진 허용치 ($\epsilon = 1.0e-5$)를 만족하도록 과정을 반복한다^[7].

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\vec{x}_i - \mathbf{R} \cdot \vec{p}_i - \mathbf{t}\|^2 \quad (4)$$

여기서, \mathbf{R}, \mathbf{t} 는 각각 프레스 위치 데이터로부터 목적 곡면 데이터로의 회전행렬과 이동 변환 벡터이다. 본 연구에서는 다음 절에 기술한 것과 같이 Besl & McKay^[7]가 제시한 정식화에 과정에 따라 알고리즘을 적용하였다.

3.3.1 변환 행렬 (\mathbf{T}) 계산

두 곡면 데이터의 정합을 위해 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 먼저 프레스 위치 데이터로부터 목적 곡면 데이터로의 회전과 이동변환을 위한 변환(transformation) 행렬 \mathbf{T} 의 계산이 필요하다.

프레스 위치 데이터들의 집합 \mathbf{P} 와 목적 곡면을 이루는 점들의 집합 \mathbf{X} 의 질량 중심 좌표 $\vec{\mu}_p, \vec{\mu}_x$ 를 계산하면 식 (5), (6)과 같다.

$$\vec{\mu}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i \quad (5)$$

$$\vec{\mu}_x = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \vec{x}_i \quad (6)$$

두 곡면을 표현하는 점 좌표의 집합인 \mathbf{P}, \mathbf{X} 의 교차 공분산(Cross-Covariance) 행렬(\sum_{px})은 점 좌표의 데이터와 질량 중심으로부터 식 (7)과 같이 3×3 의 행렬로 계산하였다.

$$\sum_{px} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(\vec{p}_i - \vec{\mu}_p)(\vec{x}_i - \vec{\mu}_x)^T] \quad (7)$$

식 (7)의 각 항을 이용하여 4×4 의 대칭 행렬 $\mathbf{Q}(\sum_{px})$ 을 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{Q}(\sum_{px}) = \begin{bmatrix} tr(\sum_{px}) & \dots & \Delta^T \\ \Delta & \sum_{px} + \sum_{px}^T - tr(\sum_{px})\mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $tr(\sum_{px})$ 는 교차 공분산 행렬(\sum_{px})의 대각선 요소들의 합을 의미하며, \mathbf{I}_3 는 3×3 의 단위 행렬이다. 열 벡터 Δ 는 교차 공분산 행렬(\sum_{px})의 비대칭 요소(Anti-Symmetric) 값인 $A_{ij} = (\sum_{px} - \sum_{px}^T)_{ij}$ 로 부터 정의한 값으로 $\Delta = [A_{23} \ A_{31} \ A_{12}]^T$ 를 의미한다.

식 (8)에서 제시한 \mathbf{Q} 의 최대 고유 값과 최대 고유 벡터($\mathbf{q}_R = \vec{q}_R$)를 계산한다. 이 때 고유 벡터 \vec{q}_R 은 데이터 집합의 최적 회전을 나타내며 식 (9)와 같이 정의한다.

$$\vec{q}_R = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T \quad (9)$$

식 (9)에서 정의한 고유 벡터는 프레스 위치 데이터

로부터 목적 곡면 데이터 집합으로의 최적의 회전 변환을 나타낸다. 고유 벡터를 이용하여 식 (10)에서 설명한 바와 같이 회전 행렬(\mathbf{R})을 정의할 수 있다.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

회전 행렬(\mathbf{R})과 식 (5), (6)에서 계산한 곡면의 질량 중심 벡터를 이용하여 최적의 이동 벡터(\mathbf{t})를 계산하면 식 (11)와 같다.

$$\mathbf{t} = \vec{\mu}_x - \mathbf{R}(\vec{q}_R) \cdot \vec{\mu}_p = \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

최종적으로 앞에서 계산된 회전 행렬과 최적의 이동 벡터를 이용하여 4×4 의 동차 변환 행렬(\mathbf{T})은 다음의 식 (12)와 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{T} = [T_{ij}] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (10)과 식 (11)에 제시된 회전행렬(\mathbf{R})과 이동 변환 벡터(\mathbf{t})는 각각, Fig. 5에 보인 회전(rotation)과 이동(translation)을 각각 의미한다. 따라서 회전행렬과 이동 벡터를 선개 평면에 곱함으로써 프레스 위치 데이터를 목적 곡면 데이터 좌표로 사상시킬 수 있다.

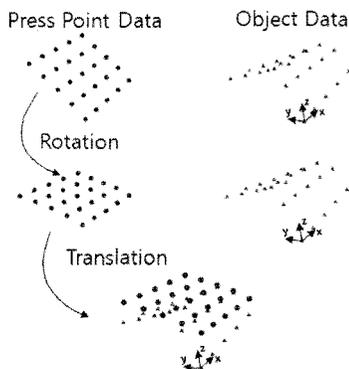


Fig. 5. Rotation and translation of the point data for registration.

3.3.2 두 곡면간 최근접의 계산

앞서도 언급했듯이, 두 곡면간 대응 관계를 알고 있

으면 앞 절에 소개된 과정을 반복하여 수행함으로써 정합과정을 완료할 수 있으나 본 논문의 경우와 같이 서로 대응관계를 알 수 없는 경우는 두 곡면간의 최근접을 계산함으로써 그 대응관계를 정의할 수 있다^[10]. 최근접 방법을 이용하면, 변환된 프레스 위치 데이터로부터 목적 곡면 상에 최소 거리를 가지는 점들의 집합으로 대응시키게 된다.

프레스 위치 데이터(\mathbf{r}')에 대응하는 목적 곡면 상의 최근접(\mathbf{r})은 식 (13)과 식 (14)와 같은 두 개의 매개 변수를 가지는 비선형 연립 방정식의 해를 구함으로써 구할 수 있다^[11].

$$\mathbf{F}_1(\mathbf{r}) = (\mathbf{T} \cdot \mathbf{r}' - \mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$\mathbf{F}_2(\mathbf{r}) = (\mathbf{T} \cdot \mathbf{r}' - \mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

식 (13)과 (14)는 동차 좌표계(Homogeneous Coordinate)로 표현되어 있으며, 두 연립 방정식에서 \mathbf{T} 는 식 (12)에 의해 계산된 변환행렬이다. 또한, \mathbf{r}' 과 \mathbf{r} 는 각각, 목적 곡면 데이터 집합 방향으로 변환되기 이전의 프레스 위치 데이터와 목적 곡면 상에 대응되는 근사 위치 데이터이다. \mathbf{r}' 과 \mathbf{r} 는 $\mathbf{r}' = \langle x_1, y_1, z_1(x, y) \rangle$, $\mathbf{r} = \langle x, y, z(x, y) \rangle$ 의 같이 매개 변수 (x, y) 와 식 (1)에 의해 정의된 다항식(z)로 표현된다.

본 논문에서는 Newton-Rapshon 방법을 이용하여 식 (13), 식 (14)에 나타난 비선형 연립 방정식의 해 \mathbf{r} 를 계산하였다. \mathbf{r} 은 변환된 프레스 위치 데이터에 대응하는 목적 곡면 상의 대응점이다.

식 (13)과 (14)는 x, y 의 다항식으로 표현되기 때문에 다음과 같이 간단한 식으로 표현될 수 있다.

$$F_1(x, y) = (Tr_1^* - x) + (Tr_3^* - z) \frac{\partial z}{\partial x} + (Tr_4^* - 1) \quad (15)$$

$$F_2(x, y) = (Tr_2^* - y) + (Tr_3^* - z) \frac{\partial z}{\partial y} + (Tr_4^* - 1) \quad (16)$$

여기서, z 는 식 (1)에서 언급한 바와 같이 x, y 의 함수이므로, $F_1(x, y), F_2(x, y)$ 는 모두 x, y 의 다항식으로 표현되며, 두 식은 비선형 연립 방정식이다. 그리고 $Tr_1^*, Tr_2^*, Tr_3^*, Tr_4^*$ 는 $\mathbf{r}' = \langle x_1, y_1, z_1(x, y) \rangle$ 에 대해 식 (12)로 주어진 변환행렬 \mathbf{T} 를 적용한 결과이다.

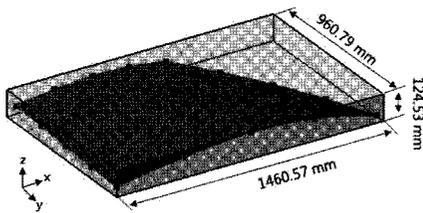
$$\begin{aligned} Tr_1^* &= R_{11}x_1 + R_{12}y_1 + R_{13}z_1 + t_1 \\ Tr_2^* &= R_{21}x_1 + R_{22}y_1 + R_{23}z_1 + t_2 \\ Tr_3^* &= R_{31}x_1 + R_{32}y_1 + R_{33}z_1 + t_3 \\ Tr_4^* &= 1 \end{aligned} \quad (17)$$

최근점의 오차(Correspondence Error)는 식 (17)에 나타낸 것과 같이 정의하였다. ϵ_{i+1} 는 이전 단계에서의 최근점(\mathbf{X})과 현재의 최근점(\mathbf{X}^{i+1})을 오차 제곱의 평균을 나타낸다. N_p 은 최근점의 개수이다.

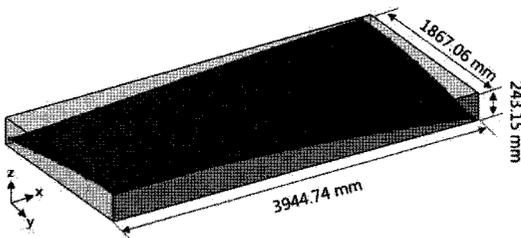
$$\epsilon_{i+1} = \frac{1}{N_p} \sum_{p=1}^N \|\mathbf{X}^{i+1} - \mathbf{X}\|^2 \quad (18)$$

3.4 두 곡면의 점합 계산 예

본 절에서는 제안한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 실제 설계된 컨테이너 운반선에서 추출한 두 개의 선체 외판 곡면을 대상으로 전개 평판과 점합계산 결과를 제시하였다. 선박 선형 정보로부터 추출한 convex 형과 twist 형의 외판 형상 정보와 전개 형상 정보를 대상으로 제안된 알고리즘을 적용하였다. 외판의 형상 정보는 TRIBON™으로부터 추출하였으며, 전개 형상은 류철호^[2]가 제시한 방법을 이용하여 구하였다. Convex 형과 twist 형의 곡면은 주로 선박의 선수미(fore/after-body)에 주로 나타나며, 이중 곡면으로 이루어진 복잡한 형상의 판이다. Fig. 6은 두 테스트 모델의 형상을 전체 Bounding Box의 크기와 함께 보여주고 있다.



(a) Convex type



(b) Convex type

Fig. 6. Registration test models.

3.4.1 Convex 형 외판

Fig. 6과 같이 convex type의 초기 외판 가공 곡면 데이터는 전개 곡면의 프레스 위치 데이터와 목적 곡면의 데이터가 다른 좌표 계 시스템으로 표현되어 있

다. 이는 두 곡면 정보가 각각 선박 CAD와 외판 전개 프로그램으로부터 얻은 값이므로, 서로 다른 좌표 계에서 표현된 것에서 이유를 찾을 수 있다.

Fig. 7의 좌측 그림은 두 곡면을 모두 isometric-view로 표현한 것이며, 두 개의 곡면이 서로 다른 좌표에 존재하고 있음을 설명하고 있다. Fig. 8의 우측 그림은 top-view에서 두 곡면을 비교하여 도시하였다. 삼각형 점은 전개 평면 상에 놓인 프레스 위치를 나타내며, 원으로 표현한 점들은 목적 곡면(실선으로 표현함.) 상에 대응하는 프레스 위치 및 목적 변위를 나타낸다. Fig. 8은 ICP 알고리즘을 적용하여 두 곡면 정보 데이터를 점합하여 하나의 좌표 계로 표현한 것이며, 좌측 그림은 두 곡면을 isometric-view로 비교한 것이며, 우측 그림은 top-view로 비교한 것이다.

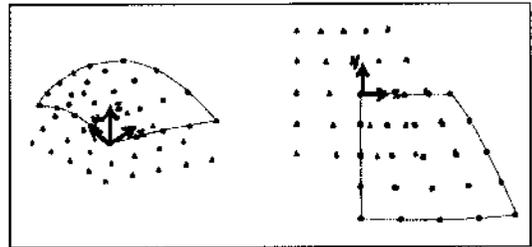


Fig. 7. Convex type: Press position and object data before registration.

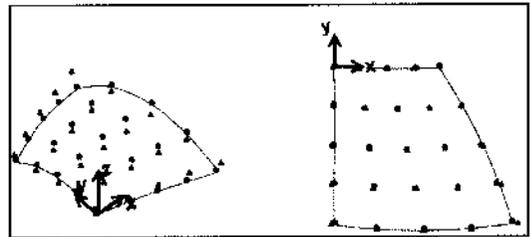


Fig. 8. Convex type: Press position and object data after registration.

Table 1. Transformation matrix for convex surface

Translation	[568.79, -481.12, 34.78]
Rotation	[0.99, -0.01, -0.02] [0.01, 1.00, -0.02] [0.02, 0.02, 0.99]
Iteration	61
ϵ	$\leq 1.0 \times 10^{-5}$

Table 1은 계산을 통해 얻은 변형 행렬의 값을 각각 이동 및 회전 성분으로 나누어 설명하였다. 반복계산에서 대응점 간 거리의 합의 변화가 1.0×10^{-5} 이내이면 곡면의 점합을 종료하도록 하였다.

3.4.2 Twist형 외판

Twist 형 판의 초기 전개 평판과 목측 곡면의 위치는 Fig. 9에 보였다. 정합 과정과 최근 점 탐색을 거쳐 구한 정합된 두 곡면은 Fig. 10에 보였다. Fig. 9은 정합하기 전에 목측 형상과 전개 형상의 위치 정보를 보이고 있으며, 두 곡면이 서로 다른 위치에 놓여 있음을 확인할 수 있다. Fig. 10는 두 형상을 정합하여 좌표계를 변환한 후에 얻어진 형상을 보여 주고 있다. Fig. 9과 Fig. 10의 좌측 및 우측 그림은 각각 isometric-view와 top-view를 이용하여 비교한 것이다.

Table 2는 계산을 통해 얻은 이동 벡터와 회전 행렬의 값과 수렴 허용 값을 정리하였다.

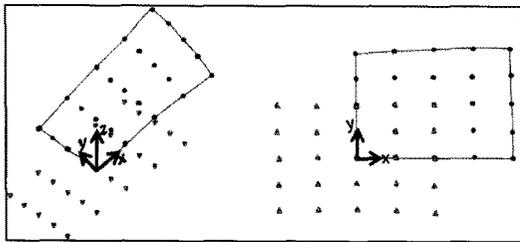


Fig. 9. Twist type: Press position and object data before registration.

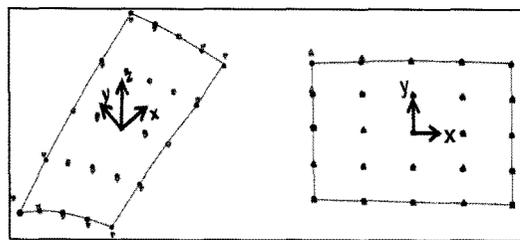


Fig. 10. Twist type: Press position and object data after registration.

Table 2. Transformation matrix for twist surface

Translation	[1940.77, 904.22, 165.42]
Rotation	[0.99, 0.01, 0.07] [-0.014, 0.99, 0.11] [-0.067, -0.11, 0.99]
Iteration	70
ϵ	$\leq 1.0 \times 10^{-6}$

4. 결 론

본 논문에서는 다짐 프레스를 가정하여 선체 외판의 가공 정보 산출에 필요한 두 개의 서로 다른 곡면

정합 방안을 제시하였다.

전개 평판과 목측 곡면 사이의 정합을 수행하기 위하여 ICP 알고리즘과 최근 점 계산 알고리즘을 혼합하여 방안을 제시하였다. 유사한 기하학적 형상을 가진 두 곡면의 정합 문제에 사용되는 ICP 알고리즘의 특성상 유사성을 갖지 않는 두 곡면의 정합 문제에 적용하기는 어렵지만, 본 연구에서는 평판과 곡면 형상을 정합 할 수 있도록 적용하였다. 제시된 방법을 이용하여 실제 선박의 외판에 적용하여 전개 형상과 목측 형상을 정합한 예를 제시하였다.

또한, 다짐 프레스를 이용한 선체 외판 성형에 적용할 수 있도록, 전개 평판 상에 위치한 프레스 위치 데이터를 목측 곡면 상의 위치로 대응시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제시한 방안은 다짐 프레스의 가공량 산출 방법¹⁵⁾과 통합되어 성형 정보를 산출할 수 있다.

향후 본 연구에서 사용한 다항식 기반의 곡면 모델 처리 방법을 NURBS나 IGES 곡면 정보 등과 같이 좀 더 향상된 곡면 모델로 개선하여야 할 필요는 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Shin, J. G. and Lee, J. H., "Nondimensionalized Relationship Between Heating Conditions and Residual Deformations in the Line Heating Process", *Journal of Ship Research*, Vol. 46, No. 4, pp. 229-238, 2002.
2. 류철호, "최소 변형률 에너지를 갖는 선체 외판의 곡면 전개 형상 알고리즘", 박사 학위 논문, 서울대학교, 2002.
3. 류철호, 신종계, "자동 매쉬 생성을 적용한 향상된 자유 곡면의 최적 근사 전개 알고리즘", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 157-163, 2006.
4. 류철호, 신종계, "변형 이론을 기반으로한 곡면의 최적 근사전개", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제7권, 제3호, pp. 190-201, 2003.
5. Lee, J. H., Yoon, J. S., Ryu, C. H. and Kim, S. H., "Springback Compensation based on Finite Element for Multi-point Forming in Shipbuilding", *Advanced Materials Research*, Vols. 26-28, pp. 981-984, 2007.
6. Horn, B. K. P., "Closed-form Solution of Absolute

Orientation Using Unit Quaternions”, *Journal of Optical Society of America*, Vol. 4, No. 4, pp. 629-642, 1987.

7. Besl, P. J. and McKay, N. D., “A Method for Registration of 3-D Shapes”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, 1992.

8. Rusinkiewicz, S. and Levoy, M., “Efficient Variants of the ICP Algorithm”, Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling 2001,

pp. 145-152, 2001.

9. Huang, X. and Gu, P., “CAD-model based Inspection of Sculptured Surfaces with Datums”, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 5, pp. 1351-1367, 1998.

10. Huang, X., Gu, P. and Zernicke, R., “Localization and Comparison of Two Free-form Surfaces”, *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 12, pp. 1017-1022, 1996.



이 장 현

1993년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 1995년 서울대학교 조선해양공학과 석사
 1999년 서울대학교 조선해양공학과 박사
 1999년~2002년 서울대학교 공학연구소 박사 후 연구원
 2002년~2005년 (주)지노스 대표이사, PLM 컨설팅 사업본부장
 2005년~현재 인하대학교 기계공학과 조교수
 관심분야: PLM, BOM, Digital Manufacturing, 선박생산시스템, 곡면 성형가공, 용접응력/강도 해석



류 철 호

1996년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 1998년 서울대학교 조선해양공학과 석사
 2002년 서울대학교 조선해양공학과 박사
 2002년~2005년 서울대학교 공학연구소 연구원
 2005년~2006년 U.S. Naval Postgraduate School 박사 후 연수 연구원
 2006년~2009년 2월 인하대학교 선박공학과 BK21사업팀 연구교수
 2009년 3월~현재 인하공업전문대학 선박해양시스템과 조교수
 관심분야: 선박생산공학, Digital Shipbuilding, 곡면 전개 및 성형



윤 종 성

2006년 인하대학교 선박해양공학과 학사
 2008년 인하대학교 대학원 선박공학과 석사
 2008년~현재 삼성중공업
 관심분야: 선박 곡면 성형, Ship CAD



이 황 범

2008년 인하대학교 조선해양공학과 학사
 2008년~현재 인하대학교 조선해양공학과 석사과정
 관심분야: PLM, BOM, Augmented Reality, Ship CAD, 선박 곡면 가공