

블록 정합 재작업 시수 예측 시스템에 관한 연구

장문석¹·유원선^{2,†}·박창규³·김덕은⁴
충남대학교 선박해양공학과 대학원¹
충남대학교 선박해양공학과²
전주비전대학교 조선해양과³
삼인정보시스템⁴

A Study on the Prediction System of Block Matching Rework Time

Moon-Seuk Jang¹·Won-Sun Ruy^{2,†}·Chang-Kyu Park³·Deok-Eun Kim⁴
Graduate School, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University²
Dept. of Ship & Ocean Engineering, Vision University, College of Jeonju³
Samin Information System⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In order to evaluate the precision degree of the blocks on the dock, the shipyards recently started to use the point cloud approaches using the 3D scanners. However, they hesitate to use it due to the limited time, cost, and elaborative effects for the post-works. Although it is somewhat traditional instead, they have still used the electro-optical wave devices which have a characteristic of having less dense point set (usually 1 point per meter) around the contact section of two blocks. This paper tried to expand the usage of point sets. Our approach can estimate the rework time to weld between the Pre-Erected(PE) Block and Erected(ER) block as well as the precision of block construction. In detail, two algorithms were applied to increase the efficiency of estimation process. The first one is K-mean clustering algorithm which is used to separate only the related contact point set from others not related with welding sections. The second one is the Concave hull algorithm which also separates the inner point of the contact section used for the delayed outfitting and stiffeners section, and constructs the concave outline of contact section as the primary objects to estimate the rework time of welding. The main purpose of this paper is that the rework cost for welding is able to be obtained easily and precisely with the defective point set. The point set on the blocks' outline are challenging to get the approximated mathematical curves, owing to the lots of orthogonal parts and lack of number of point. To solve this problems we compared the Radial based function-Multi-Layer(RBF-ML) and Akima interpolation method. Collecting the proposed methods, the paper suggested the noble point matching method for minimizing the rework time of block-welding on the dock, differently the previous approach which had paid the attention of only the degree of accuracy.

Keywords : Block alignment(블록 정합), Quality loss function(손실 비용 함수), Rework time prediction(재작업 시수 예측), K-means clustering(측정점 그룹화 방법), Concave hull(오목 외각 곡선 추출법)

1. 서론

조선소의 선박 및 생산 플랜트 생산 공정에서, 전체 시수의 최소 약 5% 이상이 오작으로 인한 교정 작업에 낭비되고 있다. 조선소들은 제작 공정에서 발생하는 용접 변형 및 정도 불량을 해결하기 위해, 자체적으로 정도 관리 소프트웨어를 사용하고 있

으나, 평가 및 분석 방법이 시스템화 된 방법이 아닌 작업자 개 개인의 기준 및 노하우에 의존하여 블록의 정도 품질을 평가하고 있다.

블록을 도크에서 탑재할 때, 블록의 치수가 허용 용접구간에 들어오지 못할 경우 튀어나온 부분을 재 절단 하거나, 블록 사이 가 너무 먼 경우엔 덧부재를 사용하여 용접을 실행하여야 한다. 이러한 추가적인 재작업 시간은 탑재시간을 증가시키게 된다. 하

지만 조선소의 건조 특성상 블록을 폐기하는 것이 아닌 재작업을 통하여 생산 흐름을 계속 유지하는 특성이 있다. 이 때문에 블록을 조립할수록 오차는 더욱 커지고 결국 생산성을 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 이러한 오차들을 사전에 체계적이고 효율적으로 관리할 수 있는 시스템이 요구된다. 사전에 블록의 오차에 따른 재작업 시수를 예측하는 것은 앞으로의 일정관리 및 정도 관리 측면에서 주요한 측면이다.

따라서 블록의 치수 오차를 사전에 예측하고 그에 따른 재작업 시수를 예측 및 감소시키려는 시도는 조선소의 조립과정의 생산성을 높이고 건조 일정관리 및 경쟁력 측면에서 큰 영향을 줄 수 있는 기술이라 할 수 있다. 이러한 필요성을 바탕으로, 광파기로 측정된 계측 점을 활용하여 원 설계 점과의 정확성만을 평가하는 기존 방식에서 벗어나 본 연구에서는 재작업 시수를 예측할 수 있는 시스템을 구축하고 이를 바탕으로 새로운 정합 방안을 제시한다.

2. 관련 연구 현황

Noh (2013)은 ICP(Iterative Closet Point) 알고리즘 (Besl & Mckay, 1992)을 적용하여 자유도가 3과 6일 경우의 3방향 회전과 3방향 평행이동을 수행하여 블록 정합을 시도하고 자유도에 따라서 다양한 경우로 구분하여 정합을 하였다. 하지만 실제 조선소에서 주로 사용되고 있는 3점 정합 방법이 아닌 전체 점을 대상으로 Error-LMS 목적함수가 가장 낮은 정합 방법을 사용하였다.

Lee and Lee (2012)은 각 측정점간의 직선을 이어 해당 선분 중에 최장 길이를 가진 선분 순서로 2개를 선택하여 3개의 매칭 점을 구하여 정합방안을 제시하고 있다. 하지만 3점의 위치가 의미가 있는 측정점이 아니라 최장 길이로 얻어진 측정 점들이므로 실제 조선소가 사용하는 방법과 비교하여 현장성이 떨어지는 단점이 있다.

Heo (2014)는 블록 매칭을 치수 오류에 의해 발생하는 간격(gap)의 관점에서 평가하였다. 구간을 하한 관리선(Lower Control Limit, LCL), 최적 간격(g^*), 상한 관리선(Upper Control Limit, UCL)의 3점을 기준으로 4구간으로 나누어서 각각의 함수를 정립하였다. 본 논문에서는 이를 적극적으로 활용하였다.

기존의 블록 정합의 연구들은, 현장에서 주로 사용하는 블록 3점 정합 방법을 고려하지 않고 계측 점들의 오차가 가장 적도록 하는 블록 정합의 방법을 제시해 왔다. 하지만 실제 현장에선 블록 종류별로 존재하는 표준 기준선의 일치 여부를 가장 중요하게 취급하고 있으며, 블록 정합은 용접 측면에서 최상의 용접 간격을 유지하는 것이 중요하고 동시에, 탑재된 블록이 다양한 조건(길이, 폭, 직진도, 편평도 등)을 최대한 만족해야 한다. 또한, 기존 방안들은 정합에 따른 치수 차이만을 제시함으로써 정작 중요한 블록의 시수 측면에서 보는 관점이 존재하지 않았다. 본 논문에선 현장에서 주로 사용되는 3점 정합 방법을 통한 정합을 시도하였

고 이를 통한 재작업 시수를 도출하였다. 이를 토대로 3점 정합 방법의 3가지 변수(gap, θ , ϕ)를 활용하고 NLP 최적화 기법을 활용하여 재작업 시수를 가장 작게 설정할 수 있는 정합하는 방법을 제시한다.

3. 3점 정합 방법의 정의

조선소에서 블록 정합 방법으로 3점 정합 방법을 주로 사용하고 있다. 이 방법은 각 블록마다 주요 3점이 다르게 정의되며 크게 2가지 방법으로 구분해서 정의할 수 있다.

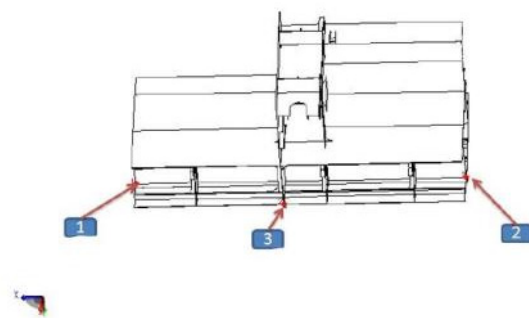


Fig. 1 Major 3 point for block case 1

Fig. 1에서와 같이 주요 3점이 정합 평면상에 모두 위치할 때 ①점과 ②점으로 이루어진 기준선을 일치시킨 다음 ③점을 기준으로 기준선 중심의 회전 값을 결정해준다. 이때의 변수 값은 gap, θ , ϕ 가 되며 각 변수 값을 결정해줌으로써 블록 간의 정합이 완료된다.

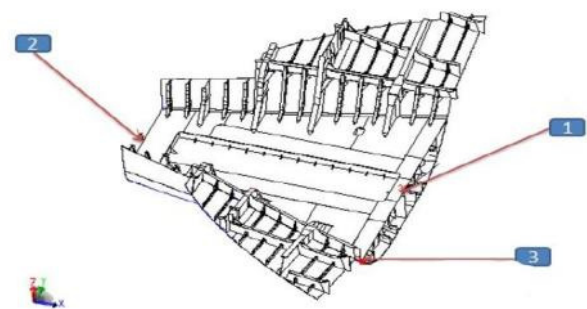


Fig. 2 Major 3 point for block case 2

Fig. 2에서와 같이 주요 3점이 정합 평면상에 위치하는 것이 아닌 ①점과 ②점으로 이루어진 기준선이 블록의 중심에 있을 경우도 있다. 이때 PE 블록과 ER 블록의 기준선을 일치시켜준 다음 ③점을 기준으로 기준선 중심의 회전 값을 결정해준다. 이때의 변수 값은 gap, ϕ 가 되며 θ 값은 ER 블록의 기준선과 PE 블록의 기준선이 180°가 되도록 하는 고정 값으로 설정된다.

4. 3점 정합 방법 구현 방안

조선소 블록 정합에 주로 사용되는 3점 정합 방안은 총 3단계로 이루어지며 각 단계에서 주요 3점과 gap, θ , ϕ 를 결정하며 정합을 하게 된다. 논문에 사용한 블록은 Fig. 3에서와 같이 방법 별로 2가지 블록을 사용하였다.

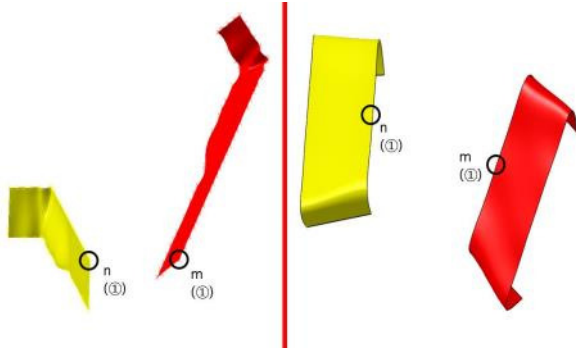


Fig. 3 Given ER/PE block 3D point set

4.1 Step. 1

Fig. 3에서와 같이 주요 3점 중 ①점을 일치시키는 단계이다. 정합 방법 1, 2에서 PE 블록의 n 점과 ER 블록의 m 점을 평행이동을 통하여 일치시켜준다. 기준점은 원하는 정도만큼 간격(주로 g^*)을 두고 정확하게 일치시킨다.

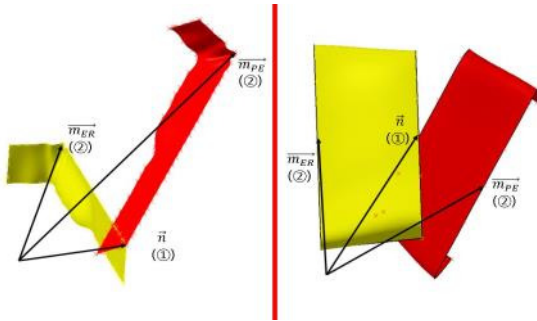


Fig. 4 ER/PE block alignment [step 1]

4.2 Step. 2

정합 방법 1의 ①점에서 PE 블록과 ER 블록의 ②점으로의 벡터를 이어 식 (1)의 내적을 통해서 사이 각 θ 를 구하고

$$\theta = \text{COS}^{-1} \left[\frac{(\overrightarrow{n - m_{ER}}) \cdot (\overrightarrow{n - m_{PE}})}{|\overrightarrow{n - m_{ER}}| |\overrightarrow{n - m_{PE}}|} \right] \quad (1)$$

식 (2)의 외적을 통해서 회전 기준벡터를 구해서 θ 각도로 회전을 통해서 ①, ② 점이 만드는 기준선을 일치시킨다.

$$\overrightarrow{\text{RotationBase}} = (\overrightarrow{n - m_{ER}}) \times (\overrightarrow{n - m_{PE}}) \quad (2)$$

정합 방법 2에선 ①점에서 PE 블록과 ER 블록의 ②점으로의 벡터를 이어 내적이 180° 가 되도록 사이 각 θ 를 식 (1)의 내적을 통해서 구하고 식 (2)의 외적을 통하여 회전기준 벡터를 구한 다음 $\theta - \pi$ 의 각도로 회전을 시도하여 ①, ②점이 만드는 기준선의 반대 방향을 향하도록 만든다.

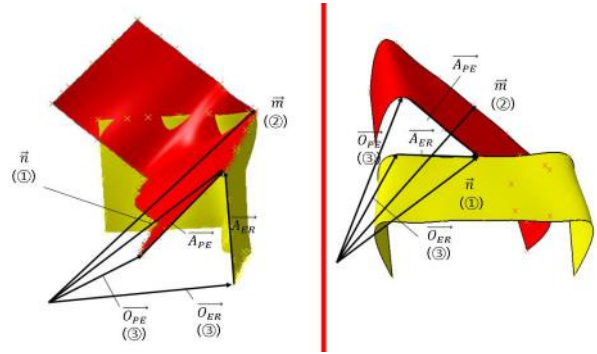


Fig. 5 ER/PE block alignment [step 2]

4.3 Step. 3

정합 방법 1, 2에서 ①점과 ②점을 잇는 벡터 $\overrightarrow{m - n}$ 을 기준선으로 두고 ER 블록과 PE 블록의 ③점에서 기준선으로의 수선을 내린다. 수선의 위치는 식 (3)으로 주어진다.

$$(\overrightarrow{m - n})t + \overrightarrow{m} \quad (3)$$

식 (3)에서 ER 블록과 PE 블록의 수선을 $\overrightarrow{A_{ER}}, \overrightarrow{A_{PE}}$ 로 정의한다. $\overrightarrow{A_{ER}}, \overrightarrow{A_{PE}}$ 은 기준선과 직교하므로 식 (4),(5)를 이용하여 t 값을 결정한다.

$$[(\overrightarrow{m - n})t + \overrightarrow{m} - \vec{l}] \times [\overrightarrow{m - n}] = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (4)$$

$$l = \overrightarrow{O_{ER,PE}} \quad (5)$$

$$t = \frac{(\vec{l} - \overrightarrow{m}) \cdot (\overrightarrow{m - n})}{|\overrightarrow{m - n}|^2}$$

$$\overrightarrow{U_{ER,PE}} = \overrightarrow{O_{ER,PE}} - [(\overrightarrow{m - n})t + \overrightarrow{m}] \quad (6)$$

식 (6)을 g^* 통해 얻어진 $\overrightarrow{U_{ER}}, \overrightarrow{U_{PE}}$ 에 t 값을 대입하여 두 벡터를 내적 하여 ϕ 값을 구하고, 기준선($\overrightarrow{m - n}$)을 기준으로 ϕ 만큼 회전을 통해서 일치시킨다. Fig. 6은 Step 1, 2, 3을 거쳐 ER 블록과 PE 블록이 정합된 모습을 보여준다.

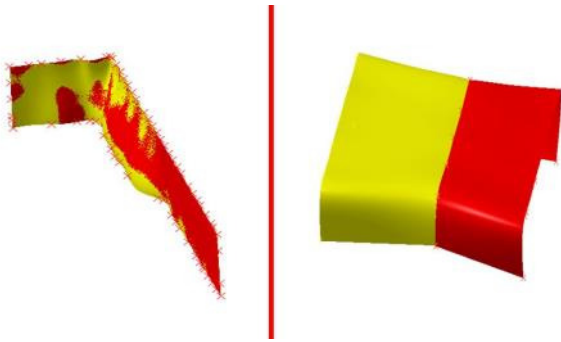


Fig. 6 ER/PE block alignment[step 3]

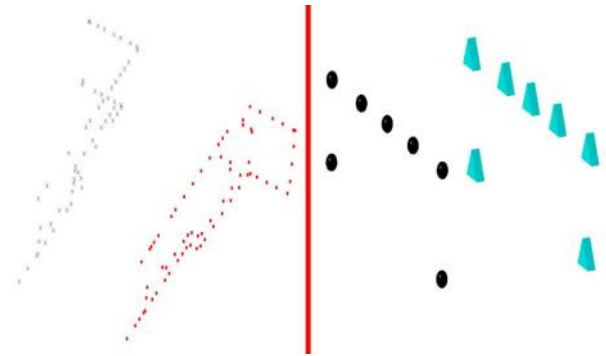


Fig. 8 Extraction of only welding point set using K-means clustering

5. 외각 측정 점 자동 획득

5.1 K-means clustering Algorithm

K-means clustering algorithm (Pham, et al., 2004)은 AI의 한 부류인 Unsupervised classification의 일종으로 PE 블록과 ER 블록에서 주어진 측정 점 중에서 현 정합에 참여하는 면상에 위치하는 것들만 자동 분리할 수 있다. 그 외 측정 점들은 블록의 외각 곡선 형성에 불필요하므로 제외한다. 본 알고리즘은 측정 점들 간의 그룹을 다른 가이드 없이 자율적으로 구분하여 분리한다. 그 과정은 Fig. 7에 나타나 있다.

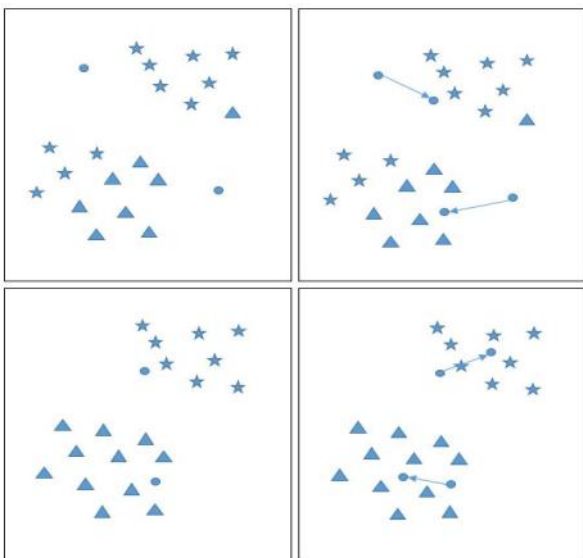


Fig. 7 K-means clustering

1. 측정 점들을 정합 평면으로 분리하여 위치시킨다.
2. K-value 값에 따라서 기준점들을 임의의 좌표 상에 위치시킨다. (여기선 K-value를 2로 가정)
3. 기준점들과 가까운 점들을 묶어서 그룹을 만들고 그 점들의 중심점을 정하고 중심점이 기준점이 된다.
4. 3번 과정을 반복해서 기준점이 이동이 없을 때까지 반복한다.

K-means clustering 방법을 사용하게 되면 Fig. 8의 그림처럼 블록의 측정 점들 중 정합 평면상의 측정 점들(Fig. 8의 우측)만 얻을 수 있다.

5.2 Concave hull algorithm

5.1장의 과정을 통해 획득한 측정 점들에는 블록의 외각 곡선을 얻어오는데 필요한 측정 점들 이외에도 내부의 의장품 혹은 보강재에 관한 측정점이 존재할 수 있다. 이러한 측정 점들은 본 연구에서 대상으로 하는 외판 용접 평가에 불필요하므로 제거해야 한다. 이를 위한 방법으로 Concave hull (Park & Oh, 2012) 방법을 사용하였다. 그 과정은 Fig. 9에 나타나 있고, 다음과 같은 순서로 진행된다.

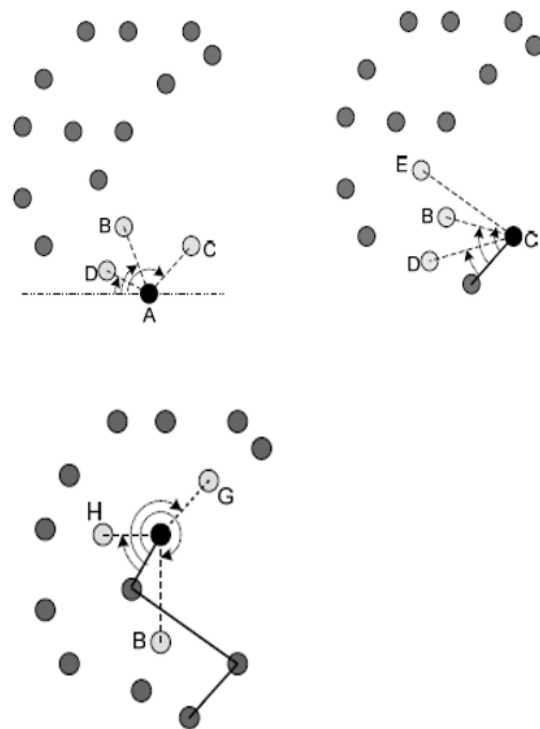


Fig. 9 Concave hull algorithm

1. 제일 아래 왼쪽 아래 점을 기준으로 시작한다. (A점)
2. K-nearest value를 3으로 설정했을 때, A점에서 가장 가까운 3점을 선택한다. (B, C, D점)
3. A점 기준으로 x 축과 양의 방향으로(시계방향) 각도가 가장 큰 점을 선택하고 그 점이 다음 기준점이 된다. (C점)
4. 다음 기준점인 C점을 기준으로 가장 가까운 점 3점을 선택하고 A-C 선분과 이루는 각도가 가장 큰 점을 선택한다. (E점)
5. E점 기준에서 각도가 가장 큰 점은 B점이나 지나온 선과 겹치게 되므로 이때는 그 점을 제외한 후 각도가 큰 점인 G점을 선택한다.
6. 시작점으로 돌아올 때 까지 반복한다.
7. 선택된 점들을 이으면 Fig. 10처럼 측정 점들이 주어졌을 때의 외각 커브를 얻을 수 있다.

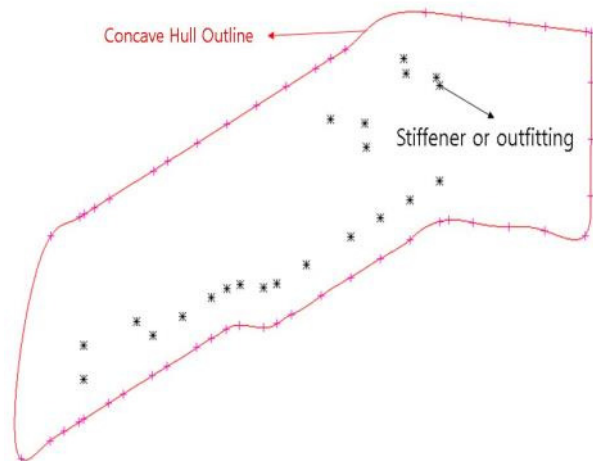


Fig. 10 Concave hull test curve

6. 정합면 곡선 형성 방법

6.1 RBF-ML

K-mean clustering과 Concave hull을 통해서 얻은 순수 정합용 외각의 측정 점들을 대상으로 곡선을 근사할 때 데이터들의 간격이 균일하지 않다. 그러므로 Gaussian radial basis function을 사용하고 학습해서 수렴 속도와 정밀도를 향상하기 위한 방법으로 RBF-ML (Buhmann, 2003)를 사용한다.

RBF-ML의 방식은 3가지 주요 파라미터의 영향으로 곡선을 형성하게 되는데, Layer, Radial, Regularization의 값에 의해서 곡선의 형태가 바뀐다.

- Layer : 해의 정밀도와 계산비용에 영향을 주는 값, RBF-QNN 즉 Layer 층이 1인 알고리즘과 구분되는 주요인자이다.
- Radial : 해의 정밀도를 유지하는 역할, 보통 노드 간의 거리

의 2~4배 값을 주는 것이 좋다. 너무 큰 값은 ill-conditioned 한 문제를 만들어 낸다. 각 반복마다 해당 값은 반으로 줄어들며 마지막에는 $RBase \cdot 2^{-(N_{Layers}-1)}$ 로 준다.

- Regularization : 작은 수치($10^{-4}, 10^{-3}$)는 초기 정밀도향상에 주요한 역할을 하지만 점점 사이에 overfitting을 유발하는 요인이 되기도 한다. 큰 수치의 값은 데이터에 포함된 잡음을 제거하는 데 큰 도움이 된다.

본 알고리즘은 노드들이 어떠한 분포를 가지더라도 충분히 정밀한 Regularization을 유지할 수 있도록 하였고, 아무리 큰 데이터라도 실용적으로 활용될 수 있도록 아주 빠른 계산 비용 ($N \cdot \ln(N)$)을 가진다.

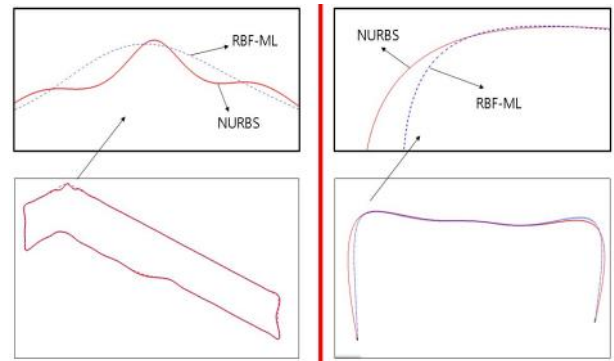


Fig. 11 NURBS(Solid line), RBF-ML(Dotted line) curve comparison

Fig. 11에서 실선으로 나타나는 NURBS 곡선과 점선으로 보이는 RBF-ML을 비교한 모습이다. NURBS보다 주름(wiggle) 현상이 현저히 줄어든 모습을 볼 수 있었으며, 직각으로 만나는 블록 형상을 비교적 잘 표현하고 있음을 확인하였다.

6.2 Akima Interpolation

Akima 내삽법은 기본적으로 B-Spline의 기본 원리로 형성되지만 실제 블록 모서리의 직각적인 부분의 표현에 가장 적합한 근사 방식이다. B-Spline은 각 측정 점에서 C_2 을 만족하면서 곡선을 도출하지만, Akima 방식은 주변 점들의 경향을 토대로 필요에 따라 일부 연속성을 만족시키지 않아도 되도록 곡선을 만드는 특징을 가진다 (Akima. 1970).

Fig. 12 는 Akima의 성향을 잘 나타낸 예제이다. 참고로 점들은 원 곡선에서 표본을 뽑은 학습점이며, 실선은 B-Spline, 점선은 Akima 내삽법의 결과이다. 정보가 부족한 샘플링 점들을 대상으로 Akima 내삽법은 급격한 변화가 발생하는 부분의 묘사에서 B-Spline 보다 효과적임을 확인할 수 있다.

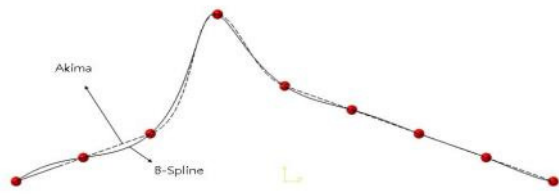


Fig. 12 Comparison btw B-Spline & Akima interpolation

측정된 두 점을 a, b로 나타낸다면 그사이를 식 (7)처럼 n개로 나눌 수 있다.

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b \quad (7)$$

이때 a 점과 b 점 사이를 이어주는 곡선 $S(x)$ 는 B-Spline에서 3차 곡선으로 나타나며, 이때 모든 연속 점에서 C_2 을 만족시킨다. Akima 내삽법은 최소 앞뒤 2점에 기울기 및 곡률의 경향을 토대로 변화율이 높을 경우 C_1, C_2 을 포기하고 C_0 만 일치하도록 곡선을 그린다.

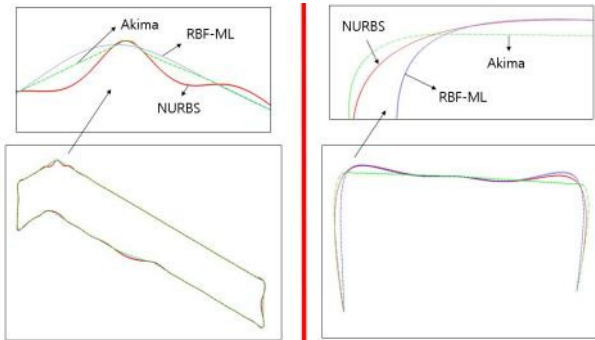


Fig. 13 NURBS(solid line), RBF-ML(dotted line), Akima Interpolation(broken line) curve comparison

Fig. 13은 NURBS(실선), RBF-ML(점선), Akima(파선)를 비교하였다. Akima 내삽법은 블록의 정합 면을 표현하는 부분에서 가장 적합한 방안이라는 것을 가시화하였다. 물론 NURBS 및 B-Spline 기법에서도 어떤 특정 점에서 급속한 변화를 표현하려면 Knot insertion 등의 방법으로 이를 구현할 수 있다. 하지만 본 예제는 어떤 특정점이 급격한 변화를 가져오는 부분인지 알 수 없는 상황에서의 대처해야 하는 문제임을 주지할 필요가 있다.

7. 재작업 시수 예측

7.1 손실 비용함수 정의

조선소의 블록 생산 방법은 연속적으로 조립해서 선박을 만드

는 방식으로 측정 치수에 오류가 발생해도, 조립을 계속 이어 나가야 하는 특성이 있다. 그러므로 단순히 치수 차이만이 아닌 그 차이가 후행 작업에 영향을 미치는 재작업 시수(rework time)의 관점에서 해석되어야 한다.

$$q_r(x, t) = q_{mr}(x, t) + q_{rr}(x, t) \quad (8)$$

$$= k_{mr}\rho_s t(-x + g^*) + k_{rr}t \text{ if } x < LCL(=0)$$

$$q_b(x, t) = q_{mb}(x, t) + q_{rb}(x, t) \quad (9)$$

$$= k_{rb}t(-x + g^*) \text{ if } LCL(=0) \leq x < g^*$$

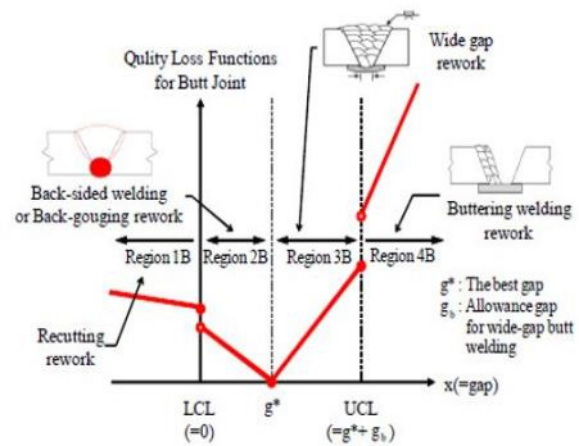


Fig. 14 Quality loss function, (Heo, 2014)

$$q_w(x, t) = (k_{mw}\rho_w + k_{rw})t(x - g^*) \quad (10)$$

$$\text{if } g^* \leq x < UCL$$

$$q_t(x, t) = q_{mt}(x, t) + q_{rt}(x, t) \quad (11)$$

$$= (k_{mt}\rho_w + k_{rt})t(x - g^*) + k_{pt}t \text{ if } x \geq UCL$$

where,

- q_r : 1번 구간의 재작업 시수 [MH/m]
- q_{mr} : 1번 구간의 재료에 대한 시수 [MH/m]
- q_{rr} : 1번 구간의 용접에 대한 시수 [MH/m]
- k_{mr} : 재료에 관한 후처리 시수 [MH/kg]
- k_{rr} : 재 절단에 관한 시수 [MH/m]
- V_s : 단위길이 당 재료의 부피 [m^3/m]
- ρ_s : 밀도 [kg/m^3]
- t : 재료의 두께 [mm]
- x : gap [mm]
- g^* : Best gap [mm]

Fig. 14는 손실 비용함수 (Heo, 2014)를 4구간으로 분리하여

정의한 그림이며 각 구간은 Recutting(식 8), Back-sided welding(식 9), One-sided multiple welding(식 10), Buttering welding(식 11)의 구간으로 구분된다. 각 계수 값은 DB의 원 단위 데이터를 통하여 결정되며, g^* 와 UCL(Upper Control Limit)은 K 조선소에서 제공한 데이터를 활용하여 다음 절과 같이 재작업 시수를 예측하였다. 이에 관한 정보는 조선소의 요청으로 구체적인 자료를 제시할 수 없었다.

7.2 재작업 시수 예측

재작업 시수는 정합 방법, g^* 혹은 판의 두께 등, 여러 가지 요소에 의해 차이가 발생한다. 본 논문에서 3점 정합 방법을 기준으로 여러 가지 정합 방법을 시도하였다. 첫 번째 시도로 3점을 일치시킬 때 간격을 0으로 설정하여 정합하였다. 두 번째 시도는 손실 비용함수에서 재작업 시수가 가장 낮게 계산되는 간격이 0이 아닌 g^* 로 설정하였다. 그 결과 예상과는 달리 g^* 만큼 블록 사이의 차이를 설정하였을 때, 오히려 재작업 시수가 증가하는 결과를 얻었다. 그 결과는 계측 점 사이를 이어주는 근사 곡선의 형상에 기인한 것이다. 세 번째 시도로 3점 정합 방법에서 파라미터인 3가지 계수 값(gap, θ , ϕ)을 최적화하여 재작업 시수를 줄이려고 노력했다.

Table 1과 Table 2는 0-간격 방안, g^* -간격 방안, 최적화 방안을 통해서 얻은 정합 방법 1, 2에 대한 재작업 시수이며 Table 1의 θ 값은 3점 정합 방법에서 정합 방법 2의 Step 2 과정으로 인해 180° 로 설정되는 값이며 변하지 않는다. 0-간격 방안 일 때 보다 g^* -간격 방안일 때 재작업 시수는 증가하였지만, 최적화 기법을 통해 3가지 변수를 이용하여 얻어진 재작업 시수는 앞서 2가지 방법보다 낮게 얻어졌다.

Table 1 Case 1 rework cost

	gap[mm]	θ [rad]	ϕ [rad]	Rework cost [MH/m]
0-gap	0	1.57	0.623	9.157
g^* -gap	3.5	1.57	0.623	14.318
Optimization	1.094	1.57	0.624	7.065

Table 2 Case 2 rework cost

	gap[mm]	θ [rad]	ϕ [rad]	Rework cost [MH/m]
0-gap	0	0.785	0.785	19.116
g^* -gap	3.5	0.785	0.785	62.632
Optimization	1.030	0.782	0.783	10.050

Fig. 15는 정합 방법 1일 때 0-간격 방안, g^* -간격 방안, 최적화 방안의 3가지 정합 방법에 대해서 PE(두꺼운 실선) 블록과 ER 블록(얇은 실선)을 측정 점 주변으로 근사한 내삽법의 결과이다. x축은 측정 점들 사이의 거리를 모두 더한 값을 1로 Scale 한 값이고, y축은 정합으로 통해 이동된 계측 점의 x 방향의 간격 즉 gap 값이다. 곡선의 근사방법으로 앞서 설명한 Akima 내삽법을 사용하였다. 0-간격 방안보다 g^* -간격 방안일 때 곡선의 형상 차이 때문에 PE 블록 근사 곡선과 ER 블록 근사 곡선의 간격이 더욱 벌어져 재작업 시수가 증가한 것을 볼 수 있으며 최적화 기법을 적용하였을 때 두 곡선의 차이가 앞서 두 경우보다 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 16은 정합 방법 2일 때의 3가지 정합 방법에 대해서 전체적인 근사 곡선을 보인다.

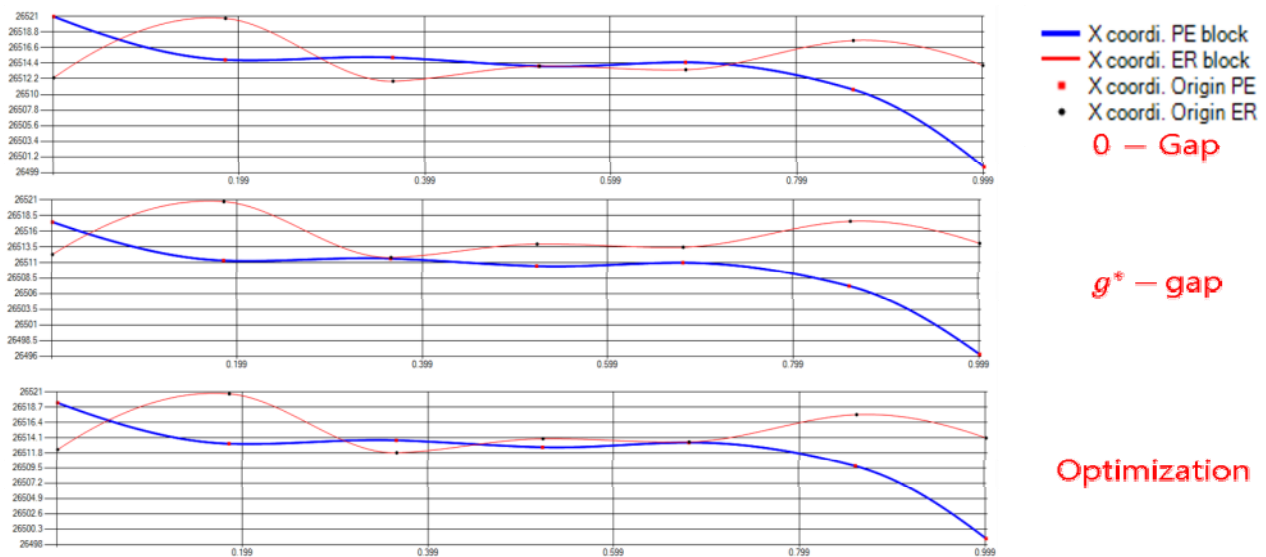


Fig. 15 Quality loss function (case 1)

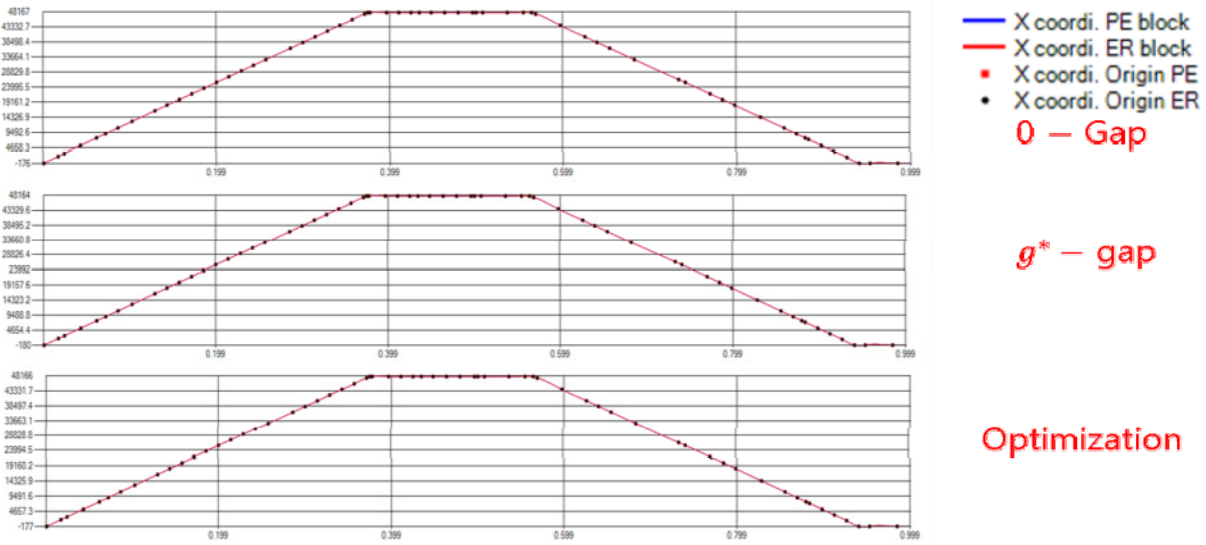


Fig. 16 Quality loss function (case 2)

7.3 재작업 시수 최적화 방법

앞서 설명된 최적화는 gap, θ , ϕ 의 3가지 파라미터를 기준으로, 아래와 같은 정식화를 통해서 문제를 구성하였고 Augmented Lagrangian 방법으로 재작업 시수가 최소가 되도록 설계 변수를 도출하였다. 현장에서 정합되는 블록들은 기준선, 블록의 길이, 편평도 등에 제한이 있다. 이러한 제한들을 만족시키면서 재작업 시수를 최적화할 수 있는 방법을 다음과 같이 제시한다.

$$\tilde{x}^T = \{gap, \theta, \phi\} \quad (12)$$

$$\min, reworktime(\tilde{x}) \quad (13)$$

s.t.

$$edge(\tilde{x}) < 100 [mm] \quad (14)$$

$$0 < design\ length - length(\tilde{x}) < 3.5 [mm] \quad (15)$$

식 (12)은 각각 정합을 위해 필요한 설계변수를 나타내고, 목적함수로는 식 (13)의 재작업 시수로 삼았다. 이 과정에서 경계 조건이 필요한데 식 (14)의 경계조건은 양 끝점의 높이 방향의 차이가 100 mm 이하로 되도록 하는 것이고, 식 (15)의 경계조건은 블록의 총 길이가 설계한 길이보다 작지 않고 3.5 mm 이상 차이가 나지 않도록 하는 경계조건을 나타낸다.

Fig. 17은 식 (14)에서 나타낸 ER 블록과 PE 블록의 편평도를 보여준다. 두 블록이 정합하게 되면 기준선 이외에도 블록이 이루는 면이 평행해야 한다. 이를 위해서 양 블록의 끝단 점을 선택하여 오차가 일정 수치 안에 들어오도록 제한하였다.

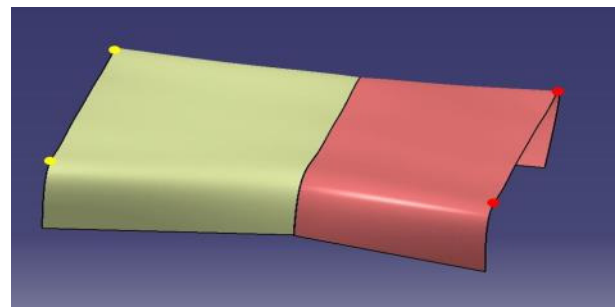


Fig. 17 Block flatness constraint

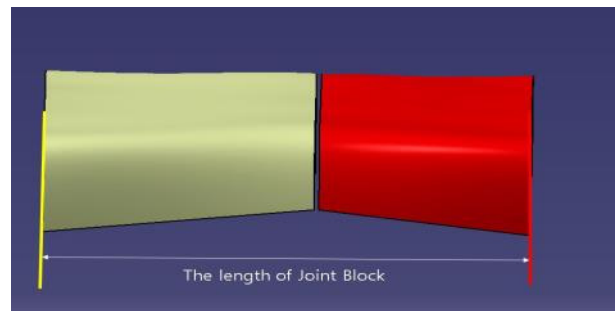


Fig. 18 Length constraint of a jointed block

편평도 뿐만 아니라 Fig. 18과 같이 두 블록의 정합 후 길이에 대한 경계 조건을 설정하였다. 이는 선박의 설계과정에서 각 구간의 설계 길이를 설정해두는데, 간격이 작거나 크게 되면 중, 대 블록의 길이가 설계보다 작거나 클 수가 있다. 이를 방지해 주기 위하여 설계 길이를 준수하는 간격 값을 설정해 두었다.

8. 결론

조선소에서는 블록의 정밀도 관리와 점검을 위해서 주로 광파

기를 이용한 계측 점을 생성하고 있다. 본 논문에서는 생성된 계측 점들을 블록 정밀도 평가에만 사용하지 않고 해당 PE 블록의 탑재에 필요한 재작업 시수를 예측하는 방안을 제시했다. 또한, 재작업 시수를 예측하는 것에 머무르지 않고 이를 이용한 새로운 정합 방안에 관해서 다른 방안들과 비교하여 설명하고 있다. 이를 구현하기 위해 개발 혹은 사용된 기술들을 정리하면 다음과 같다.

많은 계측 점들 중에서 해당 탑재 과정에서 필요한 계측 점들만 자동으로 획득하기 위해서 K-means clustering algorithm과 Concave hull algorithm을 사용하여 작업의 편의성을 향상 시켰다. K-means clustering algorithm은 정합 면에 참여하는 계측 점을 구분하는 방안으로, Concave hull algorithm은 보강재의 용접보류, 선행의장 처리 등 내부재 처리용 계측 점과 외판 용접용 외곽선 추출용 계측 점을 자동으로 구분하기 위하여 사용되었다.

위에서 필터링한 계측 점들을 활용한 외판 용접 곡선을 근사하는 방식으로 블록 형상의 특징인 직각적인 부분의 묘사에 유리한 Akima 방식 채택하였다. 근사 곡선은 재작업 시수를 예측하는데 사용되는데 이를 위한 기준으로 손실 비용함수 (Heo, 2014)를 사용하였다. 본 논문의 특징은 이를 예측하여 새로운 블록 정합 방안을 제시하였다. 블록의 정합 방법에 따라서 재작업 시수가 다르게 얻어지며, 다음과 같이 3가지 시도를 해보았다. 간격이 0이 되도록 3점 정합 방법을 사용하여 정합을 실행하였다. 또한, 손실비용함수에서 재작업 시수가 가장 낮게 계산되는 g^* 만큼 블록 간의 거리에 차이를 두어 정합을 실행하였다. 하지만 경우마다 다를 수 있겠지만 재작업 시수가 0-간격 방안 일 때 보다 곡선의 형상 차이로 인해서 증가하였다. 이를 해결하기 위해서 최적화 기법의 하나인 Augmented Lagrangian 방법을 사용하여 재작업 시수가 가장 낮아지도록 하는 3가지 변수(gap, θ , ϕ)를 구하였다. 한 블록의 정합 과정에서 한장성의 요구를 반영한 편평도 한계나 블록의 길이에 제한을 고려하여 최적의 정합 파라미터를 도출하였다. 기존 정합 방안은 단순히 계측 점들 간의 오차를 최소화하는 데 주력하였다면 본 연구는 작업 시수를 최소화할 수 있는 정합 방법을 제시하고 있으며 이는 블록 정밀도를 평가하는 새로운 접근방법이라고 생각된다. 향후 연구를 진행하며 본 방법으로 얻어진 재작업 시수 및 정합 방법을 조선소에 적용하여 효율성을 검증할 예정이다.

후 기

이 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(10067156)과 미래창조과학부 ICT융합 Industry4.0S(조선해양) 기술개발 사업 “선박구조물 생산을 위한 Shipyard 최적 생산설비 통합관리 시스템” 과제(S0602-17-1010), 마지막으로 산업통상자원부의 재원으로 엔지니어링 개발연구센터의 지원(N0000990)을 받아 수행하였습니다.

References

- Akima, H., 1970. A New method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 17(4), pp.589-602.
- Besl, P.J. & McKay, N.D., 1992. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), pp.239-256.
- Buhmann, M.D., 2003. *Radial basis functions: theory and implementations*. Cambridge University Press, Inc: Cambridge.
- Heo, H.Y., 2014. *A stochastic assessment method and its applications to the effect of welding distortion on production cost of ship and ocean plant*. Ph.D. Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- Lee, H.C. & Lee, D.M., 2012. A study on the pattern matching algorithm of 3D coordinates for quality control in ship blocks. *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, 37(10), pp.933-939.
- Noh, J.K., 2013. An algorithm for optimized accuracy calculation of hull block assembly. *Journal of The Korean Society of Marine Environment & Safety*, 19(5), pp.552-560.
- Park, J.S. & Oh, S.J., 2012. A New concave hull algorithm and concaveness measure for n-dimensional datasets. *Journal of Information Science and Engineering*, 29(2), pp.587-600.
- Pham, T. Dimo, S.S. & Nguyen, C.D., 2004. Selection of K in K-means clustering. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 219(1), pp.103-120.



장문석

유원선

박창규

김덕은