

선체 곡면의 자동 요소화

윤 태 경* · 김 동 준**
(96년 12월 26일 접수)

Automatic Mesh Generation on Ship Hull Surface

Tae-Kyung Yoon* · Dong-Joon Kim**

Key Words : Gregory surface patch method(Gregory 면조각보간방법), Node Generation(절점 생성), Modified Front Method(수정 Front법), Shape Improvement(형상 개선), Quadrilateralization(사각형 요소화), Laplacian smoothing Method(Laplacian 순정법)

Abstract

This paper describes the automatic mesh generation on the ship hull surface. At first, ship hull is defined as a collocation of composite surface patches which satisfy the geometric continuity between adjoining patches by using Gregory surface patch method. Node points that would be mesh points are generated by considering the surface curvature. The triangulation of the node points is done by the combination of Ohtsubo's method and Choi's one. After triangulation, shape improvement and quadrilateralization is done with specific criterion. An application to the actual ship and the results are shown.

1. 서 론

선형의 순정과정을 거쳐 곡면화가 이루어지고 나면 후속 설계 업무를 위한 기하학적 정보의 교류 시스템이 가능하게 된다. 이들 설계업무 중 특히 유체 역학적 성능 해석이나 구조해석의 입력모델을 작성할 경우, 선체표면을 분할하여 요소로 입력하여야 한

다. 이 과정에서 해석 자체보다는 해석 대상의 기하학적 자료 생성과 입력에 대부분의 시간과 노력이 소요되고 있다.

선체의 표면을 수많은 요소(Panel)로 분할하여 나타낼 때 주된 어려움은 선체가 3차원 물체라는 것과 많은 양의 데이터를 입력해야 한다는 것이다. 즉 선체형상에 있어서 선미부나 선수부와 같이 곡률변화

* (주) 한진중공업

** 부경대학교 공과대학 선박공학과

가 심한 부분의 형상을 적절히 표현하기가 쉽지 않다는 것과 많은 양의 데이터 입력시 오류 또한 포함될 수 있다는 것이다. 이는 요소분할의 최적화가 이루어지기 힘들다는 것을 의미한다. 하지만 최근 전산기를 이용한 선형의 수학적정의 (곡면화) 등이 가능해지고, 요소화방법들도 여러가지로 제안되어 방대한 양의 데이터를 직접 입력하지 않고 간단하고 정확하게 처리할 수 있으며, 이것과 더불어 데이터 입력시의 오류도 방지할 수 있게 되었다. 무엇보다도 최적의 요소분포를 얻을 수 있게 되었다는 것이 중요하다고 하겠다. 따라서 선체의 요소화를 자동화하는 일은 설계 및 해석업무의 일관화 시스템의 일부로서 매우 중요한 것으로 인식되고 있다.

일반적인 요소화의 방법은 크게 삼각형 요소의 생성방법과 사각형 요소의 생성방법으로 구분할 수 있는데, 유한 요소적인 해석에 있어서 보다 계산 정도가 높은 사각형 요소의 생성 알고리즘들이 최근 많이 발표되고 있다^{1)~3)}. 선박에 대해서도 김⁴⁾ 등이 상용화된 CAD Modeler에 의한 Panel의 생성 예를 보였고, 또 Jensen³⁾은 삼각형만으로 구성되는 선체곡면을 만든 후에 사용자가 정의한 허용치를 이용하여 두 개의 삼각형을 하나의 사각형으로 합치는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 Ohtsubo¹⁾ 등이 제안한 요소화 방법을 최³⁾의 방법을 이용하여 삼각형 요소화 방법을 개선하고자하였으며, 실제 선박에 적용한 결과를 제시하였다

2. 선체 곡면의 요소화

본 연구에서는 선체곡면에 대해 우선 삼각형 요소화를 행하고 이를 사각형 요소로 합체하는 요소화 방법^{1),3)}을 기반으로하여 요소화하였으며 전체적인 과정을 세분하면 다음과 같다.

- 1) 선체의 곡면화
- 2) 경계절점 및 내부절점의 생성
- 3) 삼각형 요소화
- 4) 삼각형 요소의 형상개선
- 5) 사각형 요소의 생성
- 6) Laplacian Smoothing 처리

2.1 선체의 곡면화

일반적인 곡면화 방법에는 3차원 공간상의 점 데이터를 이용하여 직접 곡면 Fitting하는 방법과 선형을 표현하는 경계곡선들을 이용하여 곡면화하는 방법이 있다⁶⁾. 경계곡선 방법은 입력곡선으로 사용되는 경계곡선들로 이루어진 면조각의 기하학적 모양에 따라 Hermite Blending, 또는 Gregory 면조각 방법등을 적용할 수 있다⁷⁾. 본 연구에서는 Gregory 면조각 보간 방법을 이용하여 곡면화하였는데, 이는 인접한 면조각과 기하학적 연속을 만족하도록 교차 경계 접선을 구하고, 그 값을 이용하여 Gregory점을 결정하여 Gregory점으로부터 조절점을 구한 후, 조절점을 곡면식에 대입함으로써 곡면상의 값을 결정하는 방법이다.

본 연구에 사용한 입력곡선을 Fig.1, Fig.2에 표시하였다.

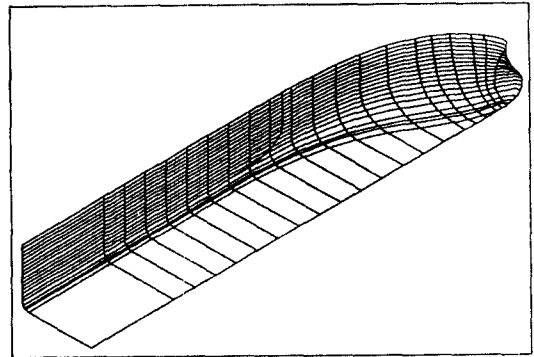


Fig.1 Input curves(fore)

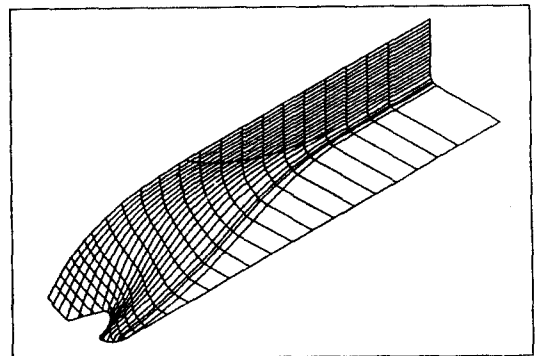


Fig.2 Input curves(after)

2.2 경계절점 및 내부절점의 생성

2.1에서 정의된 곡면을 구성하고 있는 면조각을 기반으로 요소분할을 위한 절점들을 생성시킨다. 절점의 생성은 각각의 면조각에 대하여 수행되는데, 기본적으로 면조각을 구성하는 각 경계곡선의 교차점을 우선 절점으로 생성시키며, 그 밖의 절점은 다음의 기준에 의해 생성시킨다. 첫째, 사용자 혹은 시스템이 지정한 요소 최대길이를 초과하는 면조각은 분할될 요소의 종횡비(Asspect Ratio)에 따라 2분할되고, 둘째, 면조각의 곡이 심한 부분(사용자 혹은 시스템이 지정한 허용오차를 벗어나는 부분)은 마찬가지로 방법으로 분할하여 절점을 생성시킨다. 즉 하나의 면조각에 대해 두개의 매개변수 $(u, v, 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1)$ 를 취하여 $u = 0.5, v = 0.5$ 에 대해 계산하고, 다각형 면조각의 모서리 값의 평균을 구하여,

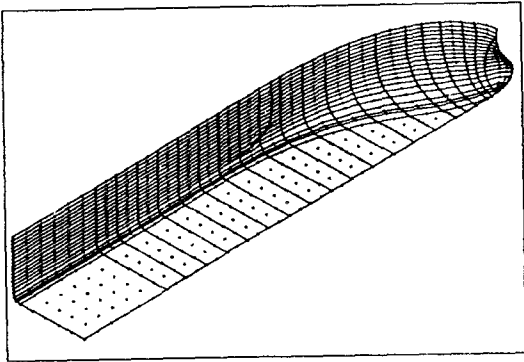


Fig.3 Result of node generation(front)

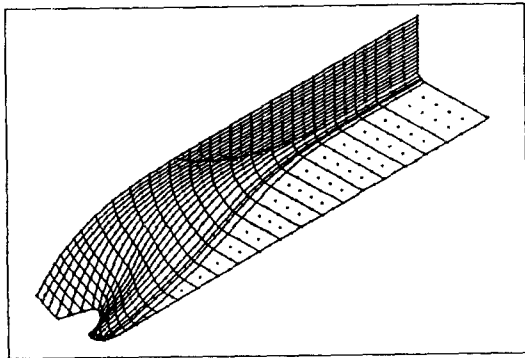


Fig.4 Result of node generation(after)

위에서 구한 값과 떨어진 거리가 오차한계 내에 들어오도록 면조각을 분할해 나간다. 이와 같은 방법으로 생성시킨 절점을 Fig.3, Fig.4에 표시하였다.

2.3 삼각형 요소화

3차원 공간상에 임의의 위치에 흩어져 있는 절점들을 삼각형으로 연결하여 요소화한다. 일반적인 삼각형 요소 생성 방법에는 Front라는 반시계 방향의 벡터집합에서 표시된 가상경계선을 가정하고, 그 좌측에서만 요소를 생성시켜가는 Front법¹⁾과 삼각형을 임의의 정점에서 이루어지는 Convex Cone으로 가정하고 삼각형의 한 변과 임의의 절점과의 Visibility를 계산하여 요소화해 나가는 Choi⁵⁾등의 방법이 있으나, 전자는 3차원 공간상에서의 적용이 쉽지 않고 요소화 대상의 경계 구분이 불확실하다는 단점을 가지며, 후자는 곡면상의 모든 점들을 볼 수 있는 임의의 정점의 설정과 단위 축 벡터(Unit Axis Vector) 설정의 어려움과, 그것에 따른 요소화 결과의 상이성을 단점으로 갖는다.

따라서 본 연구에서는 상기 방법들의 장점들을 결합하여 요소화 과정에 적용하였으며 그 과정은 다음과 같다.

(1) 요소화의 전처리 과정으로 전체 절점을 인접한 두개의 수선면곡선 사이를 하나의 Layer로, 또 Bottom부는 인접한 두개의 Frame곡선 사이를 하나의 Layer로 하여 분할한다. 이는 전체 절점에 대해 동시에 수행했을 때 발생하는 시스템의 부하를 줄이고, 아울러 요소화 결과의 유일성을 위한 것으로 결과적으로 요소는 각 수선면 및 Frame 곡선면을 경계로 하여 생성된다.

(2) 입력절점을 각 절점이 중첩되지 않는 하나의 평면에 투영하여 2차원화 한다. 이는 요소화 방법의 적용을 쉽게하고 오류를 줄이기 위한 것으로 선체의 바닥부분(Bottom)은 전체 좌표계의 평면상에 투영하고 나머지는 측면상에 투영한다.

(3) 입력절점을 경계절점과 내부절점으로 구분하고, 각 경계절점들을 반시계 방향으로 연결하는 초기 Front를 생성시켜 Front Table을 작성한다.

(4) Front Table의 순서에 따라 다음 Front를 선택해 나가는데, 우선 현재의 Front 벡터의 진행 방향에

대하여 좌측에 있는 절점들을 선택하여 Front의 양 끝점과 대상 절점이 이루는 세점을 지나는 원의 반경을 구해 놓는다. 대상 절점중에 하나의 절점을 선택하여 Front를 생성시키는데, 원의 내부에 다른 절점을 포함하지 않는 절점의 List를 작성하고, 복수의 절점에 대해서는 계산된 원의 반경이 가장 작은 절점을 선택한다. 선택된 절점과 현 Front의 양 끝점을 연결하는 Front를 생성시켜 Cross Front를 조사하고 Cross Front가 없으면 Table에 등록한다. 위의 과정을 전체 Front에 대해 수행한다.

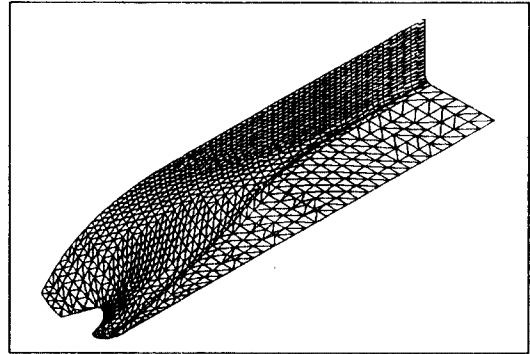


Fig.7 Result of trinangulation(after)

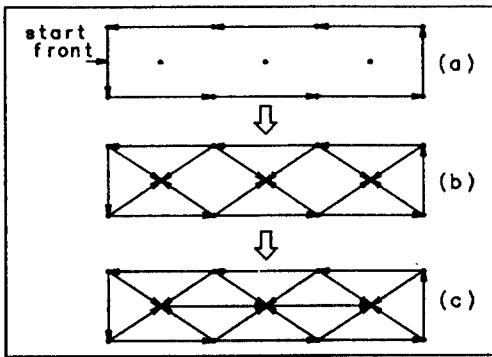


Fig.5 Generation of front. (a) initial front (b) intermediate front (c) final front

(5) Front Table의 정보를 이용하여 세 Front로 이루어지는 삼각형 요소를 찾아서 요소화하고, 이후 사용을 위해 각 Front가 이루는 요소의 번호를 저장하는 Table을 작성한다.

이상의 결과를 Fig.6, Fig.7에 보였다.

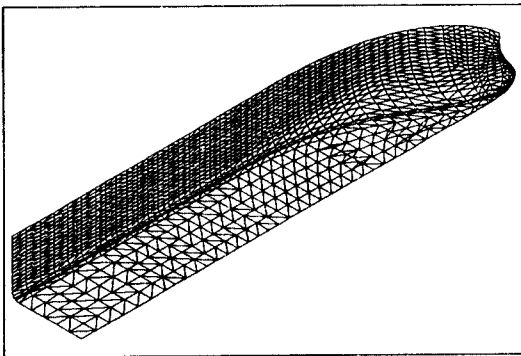


Fig.6 Result of triangulation(fore)

2.4 삼각형 요소의 형상 개선

앞의 과정에서 얻어진 삼각형 요소는 곡면을 보다 잘 표현하기 위해서 요소 형상 개선 과정을 거쳐야 한다. 요소 형상 개선을 위해서는 최적 삼각형 요소화(Optimum Triangulation)에 대한 기준(Criterion)이 확립되어야 하는데, 이는 2차원 평면에서의 경우와 3차원 곡면에서의 경우 각각 그 적용기준을 달리하여야 한다. 2차원 평면에서의 요소 개선 과정은 Max-Min Angle Criterion을 적용할 수 있다.

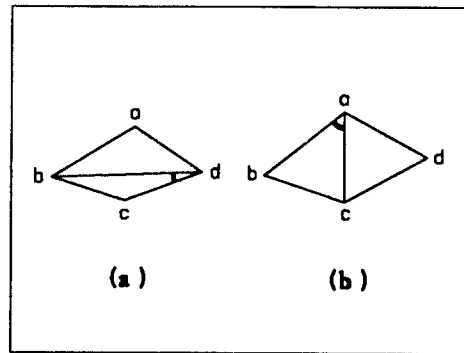


Fig.8 Max-Min angle criterion

Fig.8(a)는 두 개의 삼각형으로 구성된 사각형을 나타낸 것으로 각 bdc는 두 개의 삼각형의 최소 내각인 반면에 Fig.8(b)에서는 각 bac가 각 bdc보다 더 크기 때문에 Fig. 8(b)와 같이 삼각형 요소를 나누는 것이 좋다. 즉 두 개의 삼각형의 조합으로 형성된 사각형에 대하여, 두가지 대각선의 삼각형에 대해 최소 내각을

크게 하는 대각선을 가지는 삼각형 요소를 선택한다. 그러나 이 기준을 3차원 곡면에 적용할 경우 기하학적 의미가 반감된다. 즉, 각 삼각형의 Max- Min Angle 은 개선될 경우에도 각 삼각형이 형성하는 두 평면이 이루는 각은 더 나빠질 수도 있기 때문이다.

3차원 곡면에 직접 적용할 수 있는 기준으로 Choi 등⁵⁾에 의해 제안된 Smoothness Criterion이 있다. 이를 정리하면, Fig.9에서 보듯이 네개의 변 e_1, e_2, e_3, e_4 에 접한 삼각형의 단위법선벡터에 대한 네 개의 내적의 최소값이 최대가 되는 대각선을 선택한다. 각 변 $e(i)$ 에 대한 하나의 내적은 그 변에 접한 두개의 삼각형의 단위법선벡터에 대한 내적을 의미한다. 그러나 이 또한 곡면을 부드럽게 연결하는 요소의 선택이라는 측면에서는 바람직하나, 각 요소의 중횡비를 개선시켜주지는 않는다. 따라서 본 연구에서는 상기 두가지 방법을 혼합하여 적용하였으며 요소의 개선과정을 정리하면 다음과 같다.

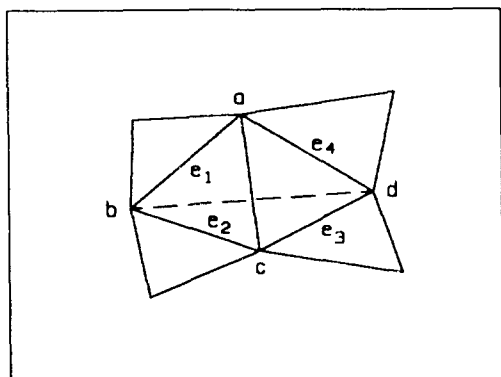


Fig.9 Smoothness criterion

요소 형상 개선 과정 :

- 1) 삼각형 변의 Table을 작성한다.
- 2) 한 변과 이를 공유하는 두 삼각형을 대상으로 다음 기준에 따라 삼각형을 구분하는 변의 위치를 바꾼다(swap).
 - Max-Min Angle Criterion이 좋은 경우 Smoothness Criterion을 적용하여 좋으면 swap한다.
- 3) 변 Table을 수정한다.

이 과정은 개선되는 것이 나타나지 않을 때까지 반

복적으로 수행된다. Fig.10, Fig.11에 그 결과를 표시하였다.

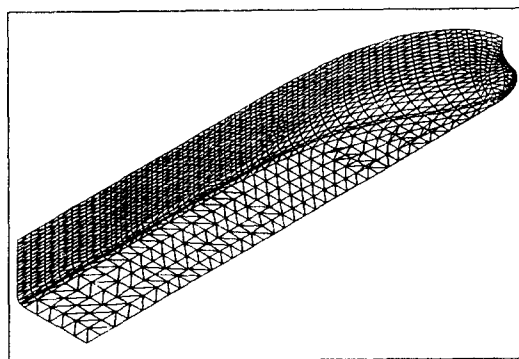


Fig.10 Result of improvement(fore)

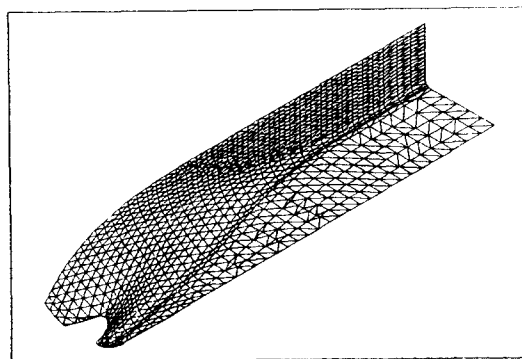


Fig.11 Result of improvement(after)

2.5 사각형 요소의 생성

이상에서 생성된 삼각형 요소의 집합으로부터 사각형 요소를 생성한다. 사각형 요소의 합체기준은 역시 중횡비를 기준으로 하였는데 이를 정리하면 다음과 같다.

사각형 요소화 과정 :

- 1) 변 Table을 작성하고, 각 변에 연결된 요소의 번호를 저장하는 표를 작성한다.
- 2) 모든 변에 대하여 다음을 행한다.

각 변에 접한 두개의 삼각형을 찾아서 길이가 긴 변을 공유하고 있을 경우, 네 꼭지점에서 절점을 공유하는 두 변의 상대각도를 구하고, 이들의 최대, 최

소각을 구한다. 상대각도의 비를 최소/최대로 취하고 이값이 일정기준 이상일 경우 합체하여 사각형 요소화한다.

이의 결과를 Fig.12, Fig.13에 표시하였다.

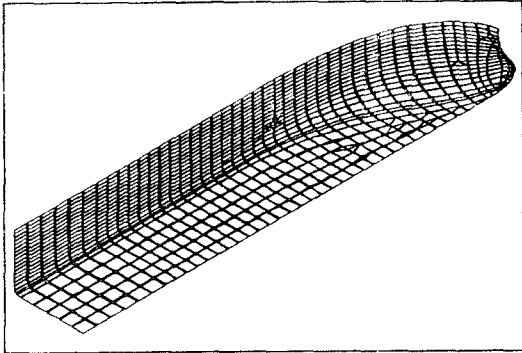


Fig.12 Result of quadrilateralization(fore)

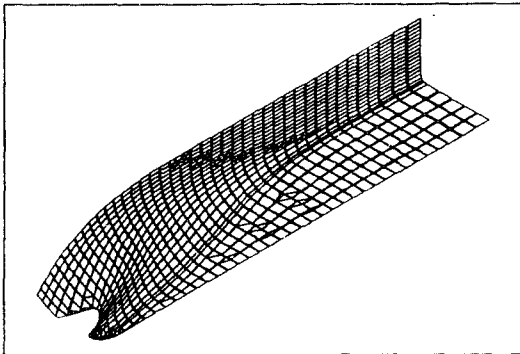


Fig.13 Result of quadrilateralization(after)

2.6 Laplacian Smoothing 처리

이상의 과정을 거쳐 생성된 요소들은 생성과정에서 어느 정도의 균형을 이루고 있으나, 절점이 밀집되어 있는 부분이나 사각형 요소의 합체 과정을 거침으로 해서 반드시 최적의 균형있는 요소의 집합이라고 말할 수 없다. 따라서 Laplacian Smoothing Method³⁾를 통해 요소 전체의 균형을 개선하였다. 이 방법은 한 내부절점 p의 현재 위치를 주위에 연결된 절점들의 평균위치와의 평균값으로 재조정하는 것으로 이를 정리하면 다음과 같다.

Laplacian Smoothing 처리 과정 :

- 1) 절점 List와 절점을 공유하는 요소번호를 저장한다.
- 2) 경계절점을 제외한 모든 내부절점 $p(x, y, z)$ 에 대해 다음을 행한다.

공유요소 각각에 대해 중심 $G_i(x, y, z)$ 를 구한다. 중심 G_i 가 이루는 다각형의 중심을 구하여 내부절점 p를 이동시킨다.

이상의 결과를 Fig.14, Fig.15에 표시하였다.

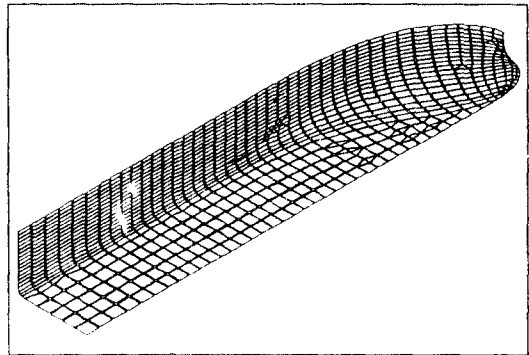


Fig.14 Result of smoothing(fore)

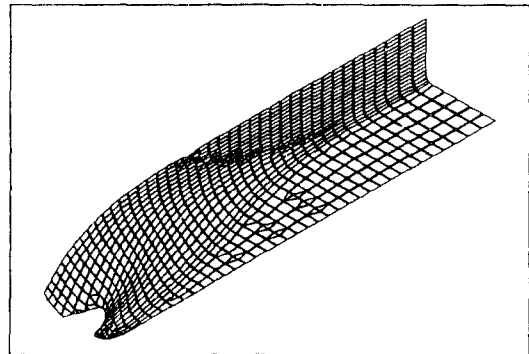


Fig.15 Result of smoothing(after)

3. 결 언

본 연구에서는 선형의 곡면화를 통해 얻을 수 있는 곡면의 요소화를 자동적으로 처리해 주는 일련의 과정을 기술하였고 이를 실 선박에 적용한 결과를 예시하였다.

선형의 곡면화는 Gregory 면조각 보간방법에 의해 이루어지며, 이 방법은 삼각형, 사각형 및 오각형 면 조각에 대해 적용가능하므로, 다수의 곡선들로 표현되는 선형을 곡면화하는데 있어서는 매우 적합한 방법으로 생각된다.

요소화의 접근 방법은 삼각형 요소화를 우선하여 사각형 요소를 생성해 나가는 방법을 적용하였으며, 이러한 접근 방법은 요소화의 대상이 3차원 물체라는 것과 곡면화의 적용이 쉽지 않은 자유곡면이라는 점을 고려할 때 바람직한 접근 방법으로 생각된다.

개발된 알고리즘들을 적용한 결과로부터 얻어진 문제점으로는 첫째, 곡면부와 평면부의 경계곡선(tangential 곡선)을 곡면화에 포함시킴으로써 불필요한 절점이 생성되었고, 둘째, 면조각의 중앙점과 모서리점과의 상대거리와 요소최대길이만을 기준으로 하여 절점을 생성시킴으로써 중복절점이 다수 생성되었으며, 곡면의 곡률특성을 충분히 고려하지 못하였다. 셋째, 2차원 형상에 적용하던 Laplacian Smoothing 처리 방법을 3차원 형상에 적용한 결과, 인접 요소의 법선벡터의 차이가 큰 부분 혹은 balancing이 필요없는 부분(평면부)에서는 오히려 요소간 균형이 나빠지는 결과를 보였다.

참고문헌

1) Ohtsubo, H., "Object 指向型 有限要素 Modeler 의 曲面 板組構造에의 適用", 日本造船學會論文集, 제170호, 1991

2) Kawamura Y., "船體構造에 있어서의 自動 MESH 生成法の 研究", 日本造船學會論文集, 제 175호, 1993

3) Jensen, P. S., "Automatic Panel Generation for Seakeeping and Wave Resistance Calculations", CFD and CAD in Ship Design, Elsevier, Amsterdam, pp.133 - 146, edited by G.van Oortmerssen, 1990

4) 김용환, 이원준, 우일국, 송치봉, 조학중, 윤덕영, "CAD Modeler를 이용한 선형의 정의 및 Panel 생성과 조파저항계산에의 적용", 대한조선학회 94춘계학술발표회, pp. 359 - 364, 1994

5) Choi, B. K., Shin, H. Y., Yoon, Y. L. and Lee, J. W., "Triangulation of Scattered Data in 3D Space", Computer Aided Design, Vol. 20 No. 5 pp. 239 - 248, 1988

6) Choi, B. K., "Surface Modeling for CAD/CAM", Elsevier, Amsterdam, 1991

7) 박지선, 김동준, "GC¹ 곡면을 이용한 선형의 표현", 대한조선학회논문집 제31권 제4호, pp. 43 - 40, 1994

8) J. A. Talbert and A. R. Parkinson, "Development of an Automatic, Two-Dimensional Finite Element Mesh Generator using Quadrilateral Elements and Bezier curve boundary definition", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 29, pp.1551-1567, 1990