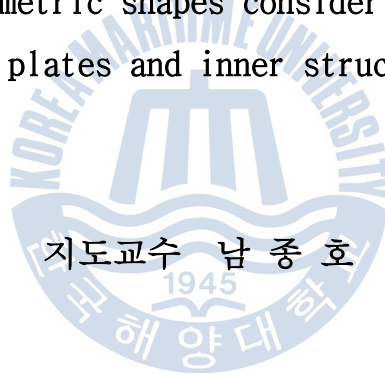


공학석사 학위논문

# 구조물의 기하학적 형상을 이용한 초기생산 단가 산정과 곡판 및 내부재 상관관계 분석

Estimation of initial manufacturing cost of structural bodies  
based on their geometric shapes considering relationship of  
outer curved plates and inner structural members



2012년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

손 세 환

本 論 文 을 康 兌 先 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

위원장            박 주 용            (인)

위 원            손 경 호            (인)

위 원            남 중 호            (인)



2012년 2월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

# 목 차

List of tables	VI
List of figures	VII
Abstract	IX
1. 서론	1
1.1. 연구 배경 및 필요성	1
1.2. 연구 내용	1
2. 주요 기술에 대한 기본 이론	3
2.1. 개요	3
2.2. NURBS	3
2.3. Rhino3D	5
3. 구조물 생산난이도 분류	8
3.1. 개요	8
3.2. 구조물 생산 공정	8
3.3. 곡률 계산	13
3.3.1. 개요	13
3.3.2. 곡률 종류	13



3.3.3. 곡선의 곡률	15
3.3.4. 곡면의 곡률	17
3.3.5. 미세곡판 곡률 근사	20
3.4. 곡 가공 단가 도표	21
3.4.1. 개요	21
3.4.2. 생산단가 판별 변수	22
3.4.3. 외관 단가도표	23
3.4.4. 내부재 단가도표	24
4. 생산단가 산정	25
4.1. 개요	25
4.2. 외관 생산단가	25
4.3. 내부재 생산단가	27
5. 생산단가 알고리즘 적용	29
5.1. 개요	29
5.2. 알고리즘 적용 결과	29
6. 결론	35
6.1. 연구 결과	35
6.2. 기여도	35
6.3. 향후 과제	35





# List of tables

Table 1 Plate manufacturing cost table	.....	23
Table 2 Stiffener manufacturing cost table	.....	24



# List of figures

Fig. 1 NURBS curve	4
Fig. 2 Local modification	5
Fig. 3 Graphic user interface of Rhino 3D	6
Fig. 4 Loft function of Rhino 3D	7
Fig. 5 Production process of the structure	8
Fig. 6 Assembly drawing	9
Fig. 7 Steel cutting process	10
Fig. 8 Block mount process	10
Fig. 9 Cold working	11
Fig. 10 Hot working	12
Fig. 11 2-direction shape case	13
Fig. 12 Curvature graph for joined curves with continuity	14
Fig. 13 Planes of principal curvature	14
Fig. 14 Gaussian curvature of shape	15
Fig. 15 Changes in the curvature of the curve	16
Fig. 16 Curvature of the surface	17

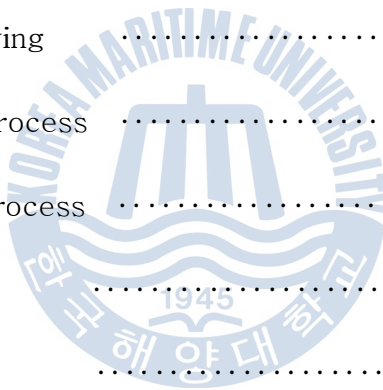


Fig. 17 Curvature approximation	21
Fig. 18 Determine the manufacturing cost variable definition (a1,a2)	22
Fig. 19 Converted to an infinitesimal plate	26
Fig. 20 Replaced by a curve	27
Fig. 21 Changes in 3D geometry	30
Fig. 22 Hull scalar metric	30
Fig. 23 2-Fold stiffener scalar metric	31
Fig. 24 3-Fold stiffener scalar metric	31
Fig. 25 4-Fold stiffener scalar metric	32
Fig. 26 5-Fold stiffener scalar metric	32
Fig. 27 Total scalar metric	33
Fig. 28 Stiffener scalar metric changed trend	34
Fig. 29 Total scalar metric changed trend	34



Estimation of initial manufacturing cost of structural bodies based on geometric shapes considering relationship of outer curved plates and inner structural members

Se-Hwan, Son

*Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering  
Graduate School of  
Korea Maritime University*



**Abstract**

Large Structures such as offshore structures and ships are required of a very complicated production process, so it can be usefully utilized to know needed information in advance. If a production difficulty is analyzed in the initial design phase, the optimal design result considering production cost can be derived through various design. In this study, it is emphasized to present quantitatively information on production cost by calculating computation index of initial production cost of offshore structures with geometrical shapes. A index that estimates a production difficulty of outer curved plates and inner stiffener of structures is developed and a comprehensive production cost index is deduced by analyzing index correlation between hull plates and inner stiffener. Production cost of outer curved plates and inner stiffener according to form changes is calculated and diverse design

verification is performed in the initial design phase through calculated production cost.



\*

# 제 1 장 서론

## 1.1. 연구 배경 및 필요성

국제유가가 계속해서 상승함으로서 해양플랜트 산업이 많은 관심과 개발이 이루어지고 있고, 앞으로도 해양플랜트 산업과 관련하여 다양한 구조물의 발주가 이어 질것으로 예상된다. 이러한 현 상황에서 구조물을 제작하는데 있어 해외 기술의존도가 높은 기본설계와 핵심 기자재 기술개발이 필요하다.

본 연구에서는 초기설계단계에서 구조물의 기하학적 형상에 따른 생산단가를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 초기생산단가 산정 알고리즘을 개발함으로써 초기설계단계에서 설계에 대한 사전 평가를 하는데 중요한 지표로 사용되고, 설계과정에서 가이드라인을 제시하여 좀 더 경제적이고 효과적인 설계를 하는데 중요한 변수로 적용될 것이다. 또한 생산 공정의 난이도를 미리 예측하여 준비 및 대비 할 수 있도록 하여 생산 공정을 효과적으로 이끌어 갈 수 있을 것으로 사료된다.

## 1.2. 연구 내용

구조물의 기하학적 형상을 정의하기 위해서 구조물 모델의 3차원 기하학적 정보고 필요하다. 하지만 기술 유출 문제로 인하여 정확한 데이터를 수집하는 것은 어려움이 있어 공개되어진 정보를 바탕으로 구조물 외관과 내부재의 데이터를 수집하고 분석한다. 분석한 데이터를 바탕으로 NURBS 곡면과 NURBS 곡선을 이용하여 구조물의 외관 및 내부재 모델링을 수행한다.

구조물의 모델링 정보로부터 생산단가산정을 위한 기초연구 수행하고 조선소의 생산전문가들을 활용하여 생산단가 아이디어 정보를 분석하여 단가산정에 필요한 데이터를 수립한다. 수립된 데이터를 토대로 구조물의 기하학적 형상에

따른 외판 및 내부재의 생산 난이도를 분류하고 구조물 형상에 따른 원가 추정식을 확립한다.

구조물의 3차원 모델링 정보를 적용하기 위한 알고리즘과 생산 난이도를 분류하기 위한 곡률 계산 알고리즘을 통합하여 구조물의 기하학적 형상에 따른 원가 산정 알고리즘을 개발한다.



## 제 2 장 주요 기술에 대한 이론

### 2.1. 개요

본 연구에서 사용된 주요 기술에 대한 정리이다. NURBS와 Rhino3D 프로그램이 연구에 활용되었으며 이에 대한 기본 이론과 설명들을 기술한다. NURBS와 Rhino3D는 모두 3장과 5장에서 사용되었고, 다음과 같은 주요 기술들을 정리함으로써 이후 자세한 설명은 하지 않도록 한다.

### 2.2. NURBS

NURBS는 Non-uniform rational B-spline의 약자로 3차원 곡선 및 곡면을 수학적으로 표현 하는 방식들 중에서 가장 진보된 방식이다. 2차원의 간단한 선분 원, 호, 곡선부터 매우 복잡한 3차원의 유기적 형태의 곡면이나 덩어리까지 매우 정확하게 표현 할 수 있으며 그 편집이 무척 편리하다. NURBS는 Fig.1 과 같이 조정점(Control point 또는 Control Vertex)이라고 불리는 제어 점을 이용하여 곡선 또는 곡면을 제어 한다. 현재 많은 상용 CAD 프로그램 (3D MAX, Rhino 3D, Maya)에서 사용되고 있다.

#### ● NURBS의 특징

NURBS는 시작 조정점과 마지막 조정점은 반드시 지나며 중간에 있는 조정점들을 근사하는 곡선 및 곡면이 생성된다. 또한 조정점들로 이루어진 직선 또는 다각형을 조정다각형(Control polygon, Fig. 1)이라 하며, 조정다각형으로 이루어지는 공간을 볼록 껍질(Convex hull)이라 한다. 조정점에 의해서 생성되는 곡선 및 곡면은 반드시 볼록 껍질 안에 존재한다. 그리고 시작 조정점, 마지막

조정점과 접하는 조정다각형의 기울기는 시작 조정점, 마지막 조정점에서의 곡선 기울기와 같다는 특징이 있다. 이와 같은 특징으로 인해 생성되는 곡선 및 곡면의 형상은 어느 정도 예측이 가능하다.

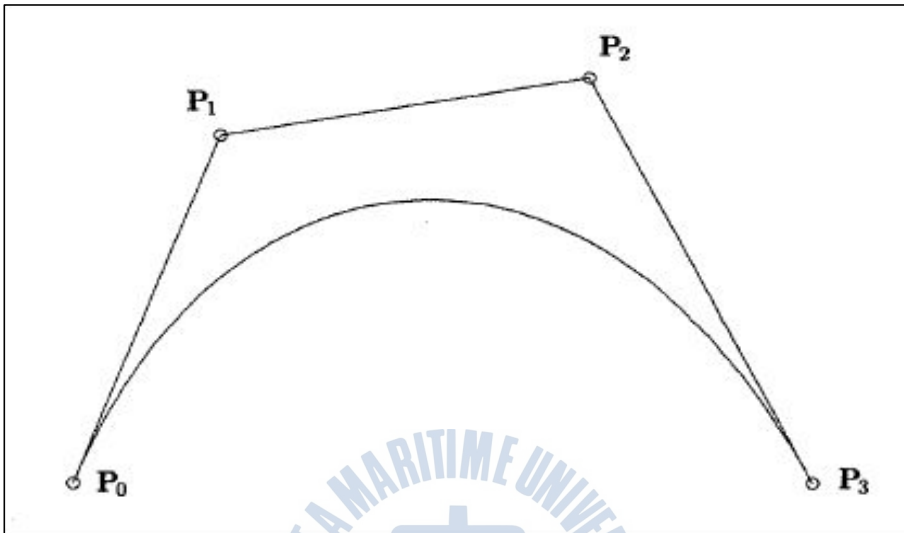


Fig. 1 NURBS curve

NURBS는 Fig. 2와 같이 조정점을 이동함으로써 곡선 및 곡면의 국소적인 수정이 가능하다. 수정된 조정점으로부터 인접한 몇 개의 조정점 범위에서만 곡선 및 곡면의 형상이 변하며 다른 부분은 동일한 형상을 유지한다. 이와 같은 특징은 전체 스타일을 유지하면서 부분적으로 세밀하게 형상을 수정하기 위해 아주 유용하다.

NURBS는 자동차나 선박의 hull과 같은 자유 형상, 원뿔의 단면, 2차 곡면과 같은 형상을 표현하기 위해 통일 된 수학적 basis를 제공 한다. 이를 이용한 형상간의 기하학적 정보를 분석 할 수 있다. NURBS에 대한 보다 자세한 사항은 참고문헌(Piegl and Tiller, 1997; Rogers, 2001)을 참고한다.

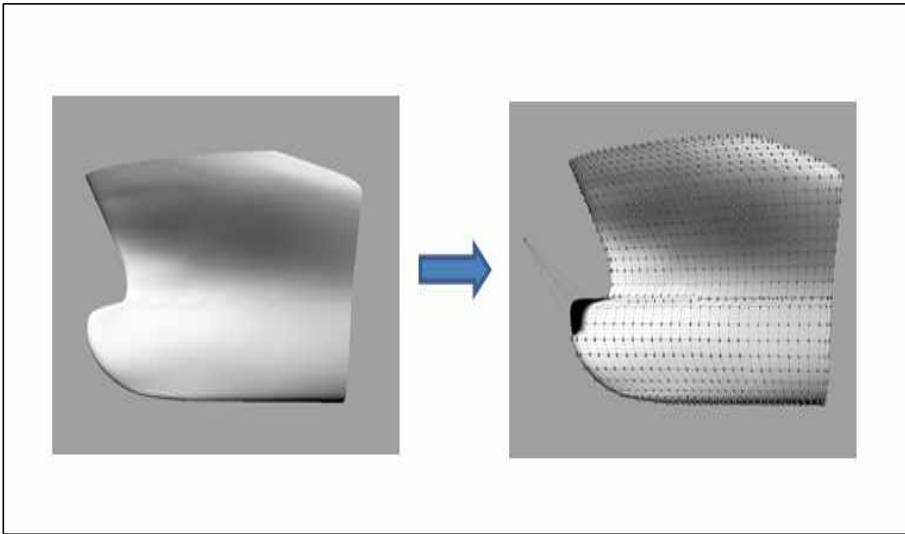


Fig. 2 Local modification

### 2.3. Rhino3D

Rhino3D는 기본적으로 제품 디자이너들을 위한 좋은 모델링 툴이다. 표현의 자유도가 굉장히 넓고 자유롭다는 것과 간단하면서 쉬운 인터페이스 구성과 빠르게 배울 수 있고 응용력을 높일 수 있다. Rhino3D는 미국의 Robert McNeel & Associates에서 개발한 수학적으로 가장 진보된 NURBS 기반의 3차원 모델링 툴로서 심장의 판막과 같은 인체기관에서, 배의 선체, 자동차 또는 작은 쥐에서 괴물에 이르는 그 어떠한 물체도 모델링 할 수 있다(Rhino3D REALITY, 2006). Rhino3D는 개인 컴퓨터용으로 개발된 모델링 프로그램이다. 단순한 형상부터 복잡한 형상까지 정확하고, 쉽고, 빠르게 모델링할 수 있다. 기본적인 렌더링 기능과 분석기능을 갖추고 있으며 각종 데이터 파일 형식을 지원하여 다른 응용 프로그램과 호환이 가능하다. CAD와 매개변수적 모델링 소프트웨어를 사용하여 제품 모델링 작업을 할 경우, Rhino3D를 보조적인 도구로 병용하면 작업 공정을 향상시킬 수 있다(Rhino3, 2003).

Rhino3D의 사용자 인터페이스는 Fig. 4와 같다. Rhino3D는 2차원뿐만이 아

니라 3차원 모델링 기능과 편집, 분석 기능을 모두 갖추고 있다. 또한 누구나 플러그인을 개발하여 기능을 추가해 사용할 수 있어서 보다 다양하게 활용할 수 있는 장점이 있다. 현재 라이노 마린(Rhino Marine)이라는 플러그인이 개발되어 있으며, 이를 이용하여 보다 정밀한 선형 생성이나 기본적인 유체정역학적 해석을 수행할 수 있다.

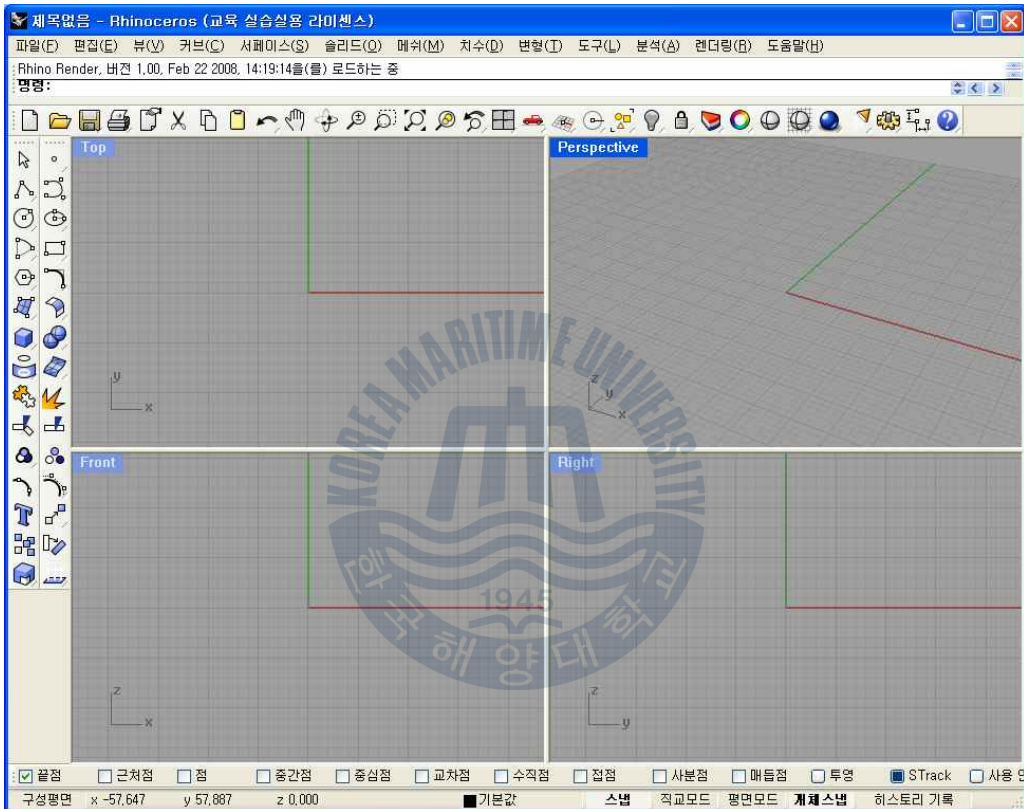


Fig. 3 Graphic user interface of Rhino3D

곡면을 생성하기 위하여 많은 기능들을 Rhino3D에서 제공하고 있는데, 본 연구에서 사용한 기능은 로프트(명령어: Loft)이다. 구조물의 형상은 3차원 자유 곡면으로 이루어져 있다. 구조물의 offset 데이터를 이용하여 커브를 생성하고, Fig. 4에서와 같이 곡면을 만드는 로프트 기능을 사용하여 구조물 외관 형상을 모델링한다.



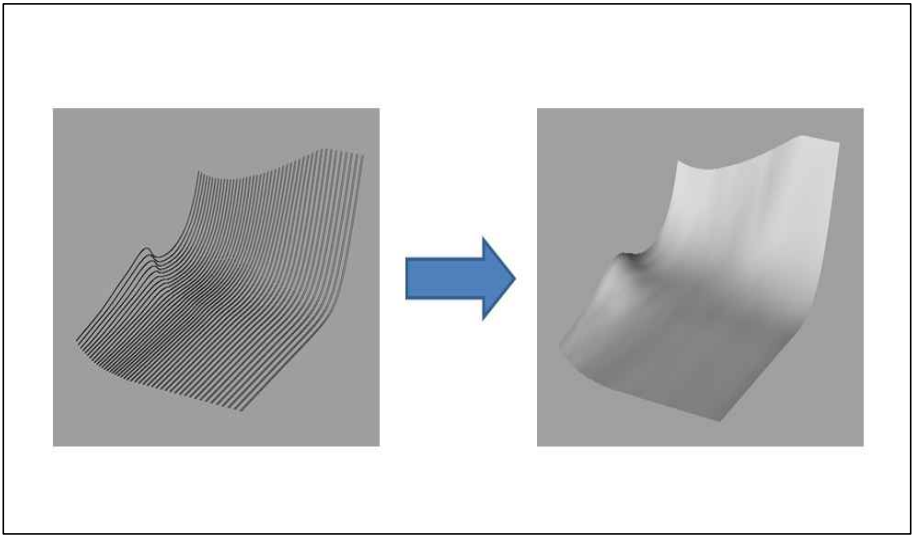


Fig. 4 Loft function of Rhino3D



## 제 3 장 구조물 생산난이도 분석

### 3.1. 개요

하나의 구조물이 만들어 지기 위해서는 복잡하고 다양한 생산 공정을 거치게 된다. 생산단가를 산정하는데 있어 모든 생산 공정을 고려하기는 어려움이 있어 기하학적 형상의 영향을 많이 받는 생산 공정을 고려하여 생산난이도를 분석하였다.

이 장에서는 전반적인 구조물의 생산 공정에 대해 알아보고 생산난이도를 분류하는 기준과 방법을 제시하였다. 이것들을 토대로 형상에 따른 구조물 외관과 내부재의 생산난이도 도표를 완성하였다.

### 3.2. 구조물 생산 공정

구조물은 복잡한 기하학적 구조와 다양한 품목으로 이루고 있어 복잡한 생산 공정을 거치게 된다. 설계부에서 생산 설계 작업이 끝이 나면 생산 도면을 검토하는 작업을 시작으로 강재 배열, 마킹, 절단, 가공, 조립, 탑재를 거쳐서 하나의 구조물로 완성이 된다.



Fig. 5 Production process of the structure

- 도면 검토

생산 설계는 작은 보강재를 시작으로 아주 큰 외판까지의 정보를 상세하게 도면에 나타낸다. 도면 검토는 마킹에 대한 정보, 용접 정보, 곡 가공 정보, Template 정보, Seam 정보등과 같이 아주 다양한 정보를 확인하여야 한다. 일반적으로 검토하는 도면으로 Remarking, Template, 조립 도면이 있다. 여러 종류의 도면 검토를 통하여 철판을 절단, 가공, 조립 과정 등의 생산 공정이 시작된다.

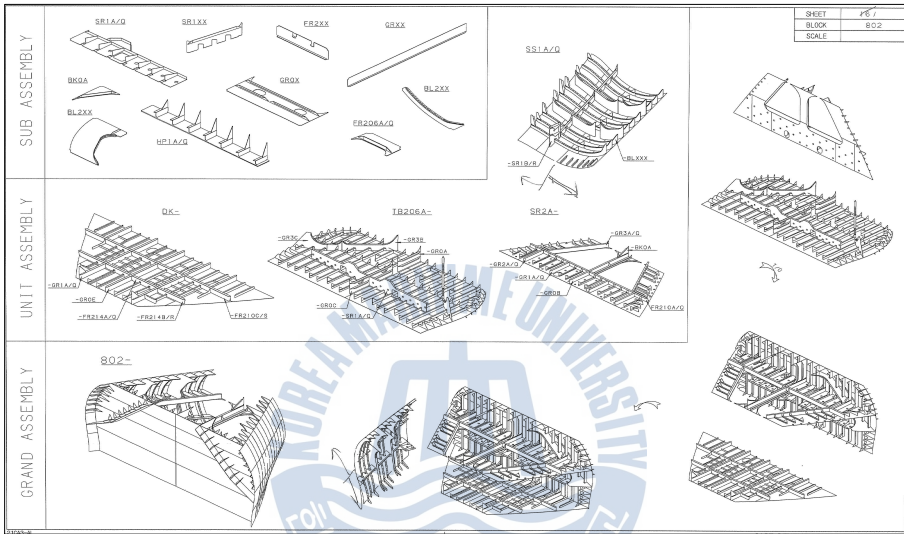


Fig. 6 Assembly drawing

- 강재 배열, 마킹, 절단 과정

도면검토 후 철판의 불순물을 제거 하고 철판의 산화작용을 억제시키기 위해 페인팅 작업이 이루어지고 철판의 절단 정보를 표시하고 철판을 절단하게 된다. Fig. 7은 위의 과정들을 보여준다.

- 가공, 조립, 탑재 과정

Template 도면을 이용하여 곡형을 제작하고 곡형을 이용하여 곡 가공 작업과 개선 가공 작업이 이루어진다. 가공 되어진 철판을 이용하여 조립 공정을 거쳐 하나의 블록이 완성되고 Dock에서 블록을 연결하여 구조물이 완성되어진다.



Fig. 7 Steel cutting process( 출처 : 삼성중공업 )



Fig. 8 Block mount process( 출처 : 현대중공업 )

모든 생산 공정은 기하학적 형상에 영향을 받게 된다. 그 중 가장 기하학적 영향을 많이 받는 생산 공정은 곡 가공 공정이다. 본 연구에서는 모든 생산 공정을 고려하기는 어려움이 있기 때문에 곡 가공 공정만을 고려하여 생산단가를 산정한다.

- 곡 가공 공정

곡 가공 생산 공정의 경우 먼저 도면을 검토하여 곡 형상에 따라 나무를 이용하여 곡형을 제작하게 된다. 곡판의 위치에 맞는 곡형을 맞추어 보면서 곡 가공 작업을 하게 된다. 곡 가공작업은 곡의 형상에 따라서 곡 가공 방식이 변하게 된다. 곡 가공 작업을 하는 방식은 두 가지 방식이 있다.

냉간 가공은 금속 등의 결정체에 재결정이 일어나는 온도보다 상당히 낮은 온도에서 소성변형을 주는 가공이다. 일반적으로 사용되는 공업재료에서 냉간가공은 열간가공과 같은 큰 소성변형을 시키기는 어려우나, 다듬질 치수의 정밀도가 좋으므로 판, 선, 관재 등의 다듬질 가공에 이용된다. 곡 가공에서 냉간가공이라 함은 Press machine, Bending machine, Rolling machine등을 이용하여 곡 작업을 하는 것을 말한다.



Fig. 9 Cold working

열간 가공은 재결정 온도 이상의 온도에서 하는 가공으로 열간가공을 하기 위해서는 소재를 가열로에 넣고 고르게 가열한 후 가공기계로 보내게 되는데, 가공기계도 작업하기 전에 그 표면을 가열하여 사용하는 것이 보통이다. 주로 조선소에서는 경험이 오래된 숙련공들이 철판에 직접 열을 가하여 철판의 변형을 이용하여 열간 곡 가공 작업을 한다. 경력이 오래된 숙련공과 비숙련공이 작업 능력은 상당히 많은 차이를 보인다. 그리고 철판의 질적인 면에서도 많은 차이



를 보이기 때문에 열간가공의 경우 거의 모든 작업을 숙련공이 한다.



Fig. 10 Hot working

비교적 곡 형상의 난이도가 낮을 경우 냉간 가공만을 이용하여 곡 가공 작업을 하고, 곡 형상의 난이도가 높을 경우 1차로 냉간 가공을 하고 2차로 열간 가공을 하여 곡 가공을 하게 된다. 아래 그림에 보이는 경우는 곡 형상의 난이도가 낮고 충분히 기계만을 이용하여 곡 작업을 할 수 있다. 이러한 경우는 비교적 작업시간도 열간가공보다 작게 들어 생산단가 역시 낮아진다.

하지만 S곡과 2방향으로 곡이 지는 곡판의 경우 1차적으로 냉간 가공을 한 뒤 숙련된 곡 가공 기술자가 직접 불을 이용하여 곡 가공을 하게 된다. 이런 경우에는 경험 많은 숙련공이 작업을 하게 되고 시간도 많이 소요되기 때문에 생산 단가가 올라가게 된다.

Fig. 11의 경우 곡의 형상이 서로 다른 방향이면서 양방향으로 져있어 고난이도의 곡 작업이다. 곡 가공 기술자가 곡 가공 작업 중인데 열에 의해 철판의 변형을 방지하기 위하여 양쪽 끝단을 고정 시켜서 작업하고 있다. 이처럼 열간 가공을 하여 곡 가공을 하는 것은 다양한 변수들을 고려하고 작업에 임해야 되기 때문에 경험과 기술력이 좋은 작업자가 대부분 작업을 하게 된다.

부재의 형상이 평판처럼 비교적 곡이 적게 들어가는 경우는 작업의 시간도 작게 걸리고 자동화가 되어 있기 때문에 생산단가가 낮아지고 Fig. 11경우와 같이 어려운 부재의 형상은 작업 시간이 증가하고 숙련공이 필요하기 때문에 생산단가가 높아지게 된다.



Fig. 11 2-direction shape case

본 연구에서는 이처럼 곡의 형상에 따라 영향을 많이 받는 곡 가공만을 고려하여 생산단가를 산정하였다.

### 3.3. 곡률 계산

#### 3.3.1 개요

곡률이란 3D 곡선과 곡면의 모델링에 널리 사용되는 개념이다. 곡률은 곡선 또는 곡면의 휘어진 정도를 나타내는 값이다. 한 점이 일정한 속도로 곡선의 호를 따라 이동할 때 생기는 접선의 기울기 변화를 의미한다. 곡률 계산은 생산단가 판별에 사용되며 생산단가를 결정하는데 주요한 인자로 사용된다. 본 연구에서는 NURBS 기반에서의 곡선과 곡면을 이용하여 곡률 계산을 한다.

#### 3.3.2 곡률 종류

- 법선 곡률 (Normal curvature)

곡면에서의 법선 곡률은 곡면의 곡률을 하나로 일반화 시킨 것이다. 곡면 위에 하나의 점과 그 점의 접평면 상에 특정한 방향이 주어졌다고 가정하면 점에

서의 법선 단면 곡률은 해당 곡면과 그 점 위에서의 법선과 위에서 주어진 방향 값들이 만들어내는 평면을 교차시킴으로써 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 곡선에서 처음 주어진 점의 곡률을 바로 법선 단면 곡률이라 한다. 이 곡률은 양수 음수 모두 될 수 있다. 만약 곡면 위 계산을 방향 값만 바꿔가며 계산한다면 그 점에서의 곡률의 최대값과 최소값을 계산 할 수 있다.

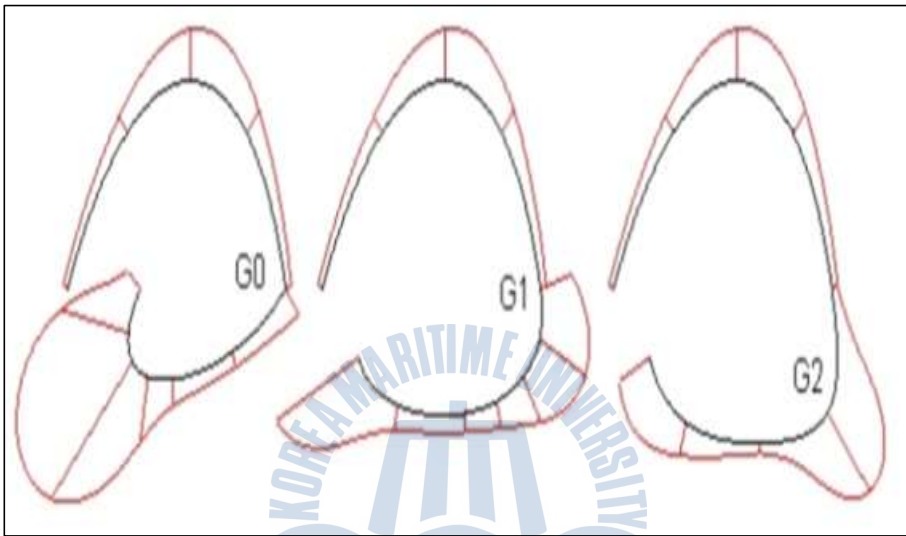


Fig. 12 Curvature graph for joined curves with continuity

- 주 곡률( Principal Curvatures)

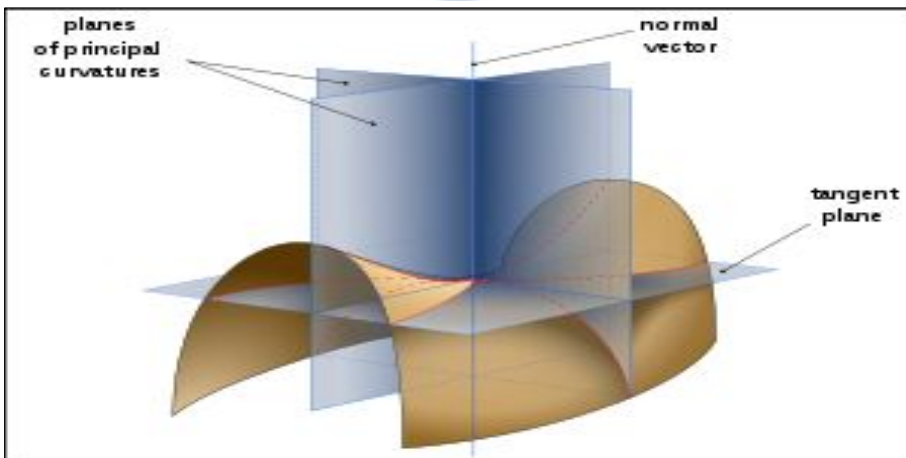


Fig. 13 Planes of principal curvature



Fig. 13에 보이는 것과 같이 한 점에서 곡면의 주 곡률은 그 점의 법선 곡률의 최대값이자 최소값과 같다. 주 곡률은 가우시안 곡률과 평균 곡률을 계산하는데 사용한다.

- 가우시안 곡률 (Gaussian curvature)

곡면상의 한 점에서 가우시안 곡률은 지점의 주 곡률들의 곱에 의해서 결정된다. 곡면상의 한 점이 양수의 가우시안 곡률을 가지면 그 점의 접평면은 해당하는 곡면과 그 점에서만 만나게 된다. 반면 음수의 가우시안 곡률을 가지는 점에서의 접평면은 해당 곡면과 그 점뿐만 아니라 평면을 가로질러 만나게 된다.

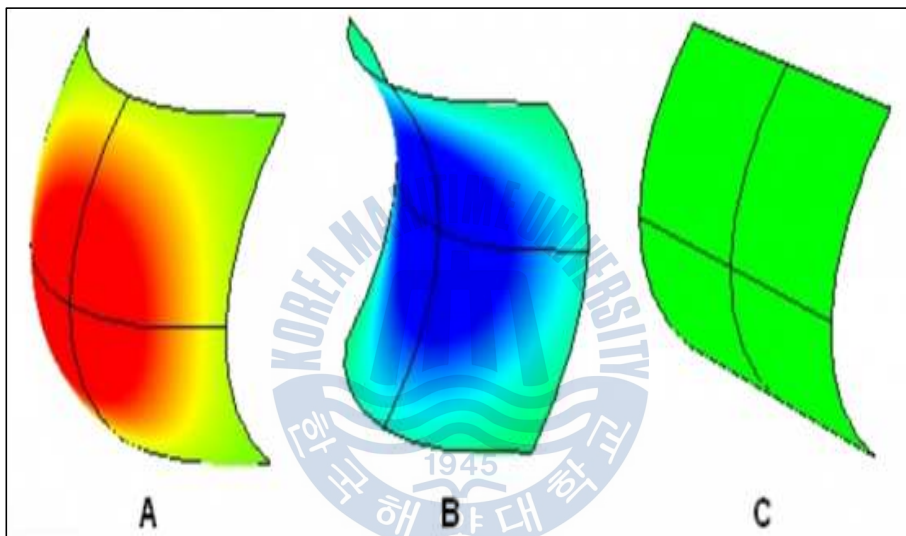


Fig. 14 Gaussian curvature of shape

A : 곡면이 볼록한 경우 가우시안 곡률은 양수이다.

B : 곡면이 오목한 경우(말안장과 같이 생긴 경우) 가우시안 곡률은 음수이다.

C : 원통처럼 곡면이 적어도 한 방향으로 평평하면, 그 곡면의 가우시안 곡률은 0이다.

### 3.3.3. 곡선의 곡률

곡선의 곡률 식은 구조물의 주요 내부재 생산단가를 산정하는데 사용된다. 곡

선의 곡률은 단위길 이당 곡선의 단위접선벡터 변화율의 비로 나타내어진다.

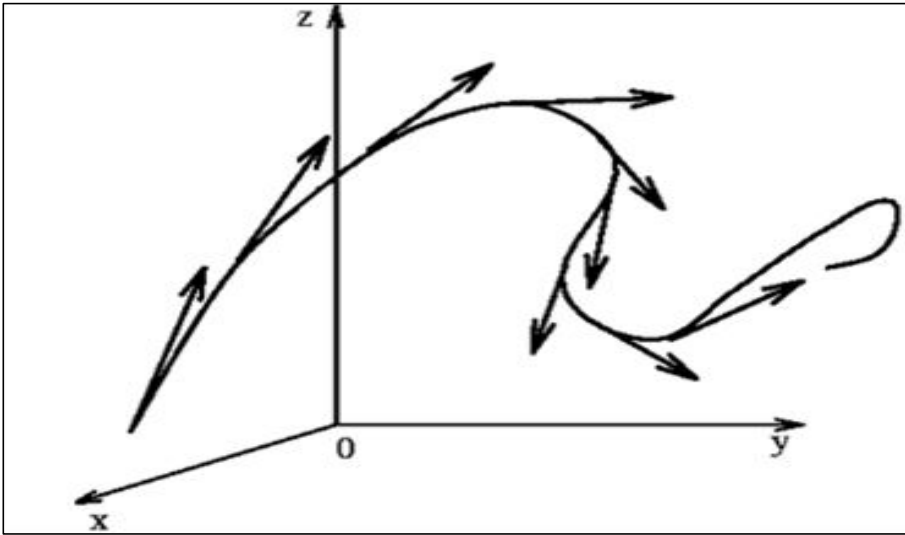


Fig. 15 Changes in the curvature of the curve

- 곡선의 길이

$$L = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt = \int_a^b \|X'(t)\| dt$$

( L = 곡선의 길이 , X'(t) = 곡선의 방정식 )

- 호의 길이 함수

$$s(t) = \int_a^t \|X'(\tau)\| d\tau \quad \text{식을 } t \text{에 대해 미분}$$

$$ds = \|X'(t)\| dt \quad \text{( } s(t) = \text{호의 길이 } s \text{의 함수 )}$$

- 단위접선 벡터

$$T = \frac{X'(t)}{|X'(t)|} \quad \text{( T = 단위 접선벡터 )}$$

- 곡선의 곡률

곡률은 어떠한 점에서 곡선이 얼마나 빨리 방향을 바꾸는가에 대한 척도이다. 좀 더 엄밀하게 말하자면 접선벡터의 변화율, 호의 길이에 대한 단위 접선벡터의 변화율을 말한다.

$$\kappa = \left| \frac{dT}{ds} \right| = \frac{\frac{dT}{dt}}{\frac{ds}{dt}} = \left| \frac{T'(t)}{X'(t)} \right| \quad (k = \text{곡률}, \text{kappa})$$

3.3.4. 곡면의 곡률

곡면의 곡률을 이용하여 구조물의 외관 생산단가를 산정하는데 사용한다. 생산단가 판별 변수를 정의하는데 곡면의 곡률을 이용하여 변수를 정의하게 된다.

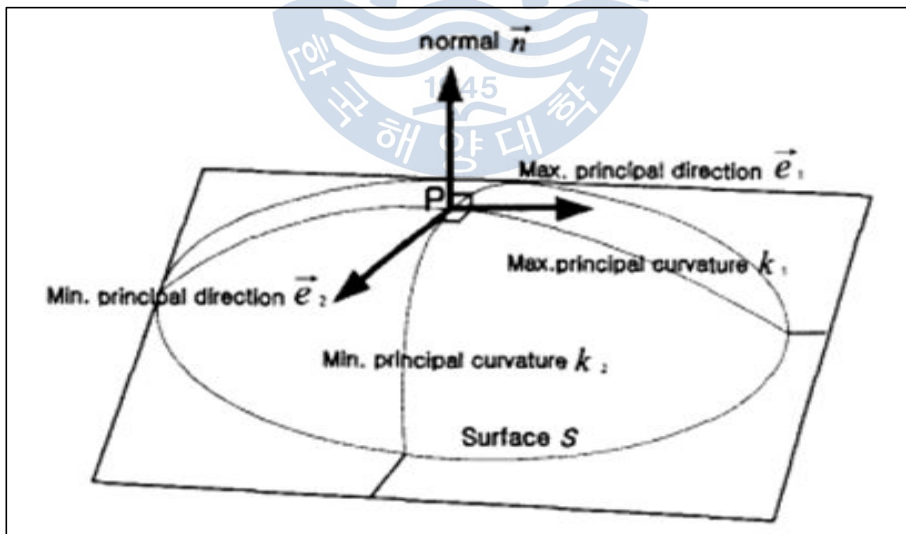


Fig. 16 Curvature of the surface

- 곡면의 곡률

$$\kappa = \kappa_n + \kappa_g$$

(  $\kappa$  = 곡면의 곡률,  $\kappa_n$  = normal curvature,  $\kappa_g$  = geodesic curvature )

생산단가를 산정하는데 필요한 요소는 곡면이 얼마나 휘어졌는지를 알아내는 것이기 때문에 geodesic curvature는 고려하지 않고 normal curvature 크기만을 고려하여 생산단가를 산정하는 사용한다. 앞에서 설명한 것처럼 구조물의 외관은 NURBS 기반의 surface로 정의하고 surface를 이용하여 곡면의 곡률을 도출한다.

- normal curvature

$$\kappa_n = - \frac{dS \cdot dn}{ds ds}$$

- Fundamental forms of surface

$$S(u,v) = \frac{\sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^N w_{jk} V_{jk} B_j^m(u) B_k^n(v)}{\sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^N w_{jk} B_j^m(u) B_k^n(v)}$$

$$dS = S_u du + S_v dv$$

(  $dS$  = 임의의 한 점에서의 Tangent Plane,  $S_u$  = Tangent Plane에서  $u$ 방향 성분,  $S_v$  = Tangent Plane에서  $v$ 방향 성분 )

임의의 두 점사이 거리를 구하는 식을 이용하여 first fundamental form을 구한다.

$$ds = \sqrt{dS \cdot dS}$$

$$First\ fundamental = E du^2 + 2Fdudv + Gdv^2$$

$$E = E(u, v) = S_u \cdot S_u$$

$$F = F(u, v) = S_u \cdot S_v$$

$$G = G(u, v) = S_v \cdot S_v$$

$$\text{Second fundamental} = -dS \cdot dn = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2$$

$n = n(u, v)$   $n$ 은 surface의 임의의 한 점에서 unit normal vector이다.

$$L = L(u, v) = -S_u \cdot n_u = S_{uu} \cdot n$$

$$M = M(u, v) = -\frac{S_u \cdot n_v + S_v \cdot n_u}{2} = S_{uv} \cdot n$$

$$N = N(u, v) = -S_v \cdot n_v = S_{vv} \cdot n$$

- Principal curvature

normal curvature의 최소값과 최대값을 말한다. Principal direction은 normal curvature의 최대값과 최소값의 방향성을 나타내는 것이다.

$$du, \frac{dv}{du} = \lambda, \frac{d\kappa}{d\lambda} = 0 \text{ 이라 두면}$$

$$(E + 2F\lambda + G\lambda^2)(M + N\lambda) - (L + 2M\lambda + N\lambda^2)(F + G\lambda) = 0$$

$$(FN - GM)\lambda^2 + (EN - GL)\lambda + (EM - FL) = 0$$

$$\kappa = \frac{L + M\lambda}{E + F\lambda} \quad \text{or} \quad \kappa = \frac{M + N\lambda}{F + G\lambda}$$

위의 두 개의 곡률 값이 normal curvature의 최대값과 최소값이 된다.

- Gaussian curvature

앞에서도 언급 하였지만 Gaussian curvature을 이용하여 곡면의 형상을 사전에 예측이 가능하고 구조물 곡률 값의 크기에 따른 분포도 알 수 있다.

Gaussian curvature는 편리하고 다양한 곳에 사용된다.

$$K = \kappa_1 \kappa_2 \quad (K = \text{Gaussian curvature})$$

Gaussian curvature의 값에 따라서 곡면의 형상이 다음과 같이 변하게 된다.

$K > 0$  , Elliptic

$K = 0$  , Parabolic or Flat

$K < 0$  , Hyperbolic

- Surface area

구조물의 생산단가는 구조물을 미소한 판으로 나누어서 생산단가를 산정한다. 생산단가를 산정하기 위해서 미소한 판의 면적이 활용된다.

$$A = \int \int_R \sqrt{EG - F^2} \, dudv$$

( E, G, F first fundamental에서 구해진다. )

$$A_{ij} = \sqrt{EG - F^2} \Delta u \Delta v$$

(  $\Delta u = u_{i+1} - u_i$  ,  $\Delta v = v_{i+1} - v_i$  )

$$A_n = \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} \sqrt{EG - F^2} \Delta u \Delta v \quad (n \rightarrow \infty \text{ 일대 } A_n \rightarrow A)$$

### 3.3.5. 미세곡판 곡률 근사

구조물의 형상에 따른 생산단가 난이도를 판별하기 위해서 곡면이 얼마나 휘어졌는지 계산하게 된다. 계산은 곡면의 곡률을 근사하여 곡면의 휘어짐을 구한다.

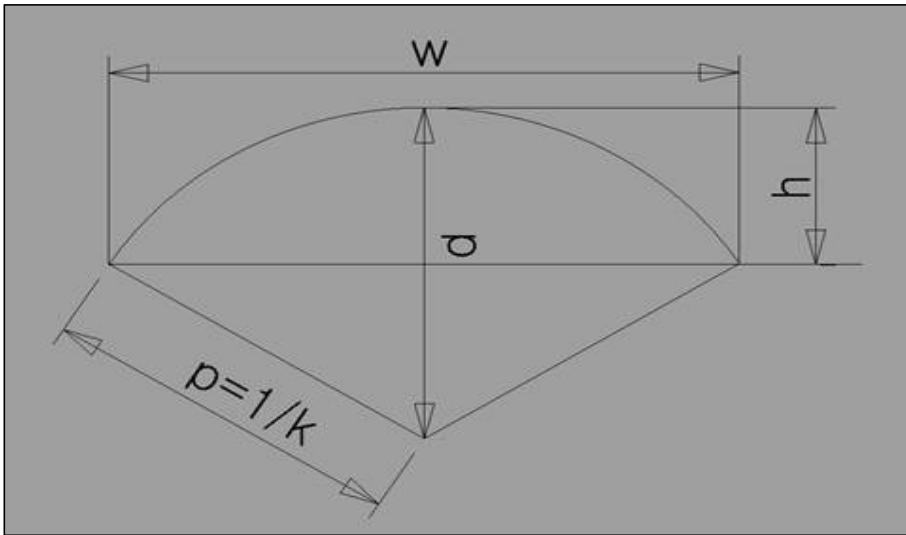


Fig. 17 Curvature approximation

- 곡판난이도 ( Backset ration : BR)

$$BR = \frac{h}{w}$$

$$h = \rho - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} = \frac{1}{\kappa} - \sqrt{\left(\frac{1}{\kappa}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2}$$

위의 식을 이용하여 곡판의 휘어짐을 곡률 근사법을 이용하여 생산단가를 산정하는데 사용한다.

### 3.4. 곡 가공 단가 도표

#### 3.4.1. 개요

대형 조선소와 관련 산업체에서 곡 가공을 하는 작업자들은 무수히 많이 있다.

곡 가공을 하는 작업자들에게서 수집한 데이터는 많은 부분이 일치하지만 곡 가공 작업경력과 작업환경에 따라서 일치하지 않는 부분도 상당히 있었다. 기하학적 형상에 따라 제작난이도는 경력이 오래된 숙련공들에게 객관적이고 신뢰성이 가는 데이터를 바탕으로 분류 하였다.

### 3.4.2 생산단가 판별 변수

대형구조물과 선박을 건조하는 과정은 복잡한 기하학적 형상으로 인해 다양한 형상의 판들을 이용하여 건조된다. 이렇게 다양한 판들의 생산난이도를 정하고 판별하는 기준이 없다. 다양한 형상의 판들을 분류하고 난이도를 측정하기 위해서는 기준이 되는 척도가 필요하다. 생산단가 판별변수는 다양한 형상의 판들을 분류하고 난이도를 측정하는 곳에 사용된다.



Fig. 18 Determine the Manufacturing cost variable definition(  $a_1$ ,  $a_2$  )

생산단가 판별 변수는 중·횡 방향 길이와 높이 비를  $a_1$ ,  $a_2$ 로 정의한다. 횡 방향 길이는 Surface Point를 이용하여 구하고 높이는 곡선과 곡면의 곡률 값을 이용하여 산출한다. 생산단가 판별 변수의 특징은  $a_1$ 과  $a_2$ 는 서로 수직 방향이고 중·횡 방향 비율 중 큰 값을  $a_1$ 로 정의하고 작은 값을  $a_2$ 로 정의한다.



### 3.4.3. 외판 단가도표

생산단가 판별 변수를 이용하여 외판 형상 타입에 따라 10가지로 분류 하였고 타입에 따른 생산단가를 산정하였다. 생산단가는 곡 가공 분야에서 많은 경험에 있는 숙련된 기술자들을 대상으로 조사 하여 객관적으로 산정하였다.

Type	Parameter		Relative Cost
	$b_1$	$b_2$	
1. Flat plate	$0.0 \leq b_1 \leq 0.01$	$0.0 \leq b_2 \leq 0.003$	1
2. Simply low curvature in one direction	$0.01 \leq b_1 \leq 0.15$	$0.0 \leq b_2 \leq 0.003$	2
3. Simply high curvature in one direction	$b_1 \geq 0.15$	$0.0 \leq b_2 \leq 0.003$	3
4. Moderate curvature in one direction and small backset in the other	$0.01 \leq b_1 \leq 0.075$	$0.003 \leq b_2 \leq 0.025$	3
5. Moderate double curvature	$0.075 \leq b_1 \leq 0.15$	$0.025 \leq b_2 \leq 0.05$	6
6. Moderate reverse double curvature	$0.075 \leq b_1 \leq 0.15$	$-0.05 \leq b_2 \leq -0.01$	9
7. High double curvature	$b_1 \geq 0.15$	$b_2 \geq 0.05$	8
8. High reverse double curvature	$b_1 \geq 0.15$	$b_2 \leq -0.05$	12

Table 1 Plate manufacturing cost table

1번 type 같은 경우는 2개의 변수가 전부 0에 가깝다. 이와 같은 경우는 곡판의 형상이 평판이거나 Bending machine이나 rolling machine으로 간단히 작업이 가능하다. 그렇기 때문에 relative cost가 가장 작은 값을 가지게 된다.

type 10의 경우는 곡판의 형상가운데 가장 난이도가 높은 것으로 양방향으로 곡이 쳐있는 형상에 곡이 쳐있는 방향이 반대방향이면서 곡률 값도 큰 것으로 상당히 곡 가공 작업하기 힘들고 까다롭다. type 10의 경우는 relative cost가

가장 큰 12를 가진다.

### 3.4.4. 내부재 단가도표

구조물 내부재의 경우 내부재 형상을 곡면으로 정의하지 않고 곡선을 이용하여 형상을 정의한다. 구조물 내부재의 생산단가 산정은 곡선을 이용하여 생산단가를 산정한다. 내부재의 생산단가는 형상에 따른 곡선의 곡률 값을 이용하여 총 4가지 타입으로 분류하였고 타입에 따른 생산단가를 산정하였다.

Type \ Parameter	$\kappa$	Relative Cost
Flat stiffener	$0.0 \leq \kappa \leq 0.002$	1
Low curvature stiffener	$0.002 \leq \kappa \leq 0.1$	2
Moderate curvature stiffener	$0.1 \leq \kappa \leq 0.2$	3
High curvature stiffener	$\kappa > 0.2$	4

Table 2 Stiffener manufacturing cost table

구조물 내부재는 아주 다양한 형상의 부재들이 많이 있다. 본 연구에서는 주요 구조부재만을 고려하였다. Flat shape stiffener의 경우는 곡이 거의 없고 평판의 내부재의 형상을 가지고 있다. Flat shape stiffener의 형상은 곡 가공작업이 필요 없거나 간단히 곡 형상을 만들 수 있기 때문에 가장 작은 relative cost를 가진다.

## 제 4 장 생산단가 산정

### 4.1. 개요

구조물의 생산단가는 전체 구조물을 미소한 외판과 내부재로 나누어 난이도를 측정하고 생산단가를 산정한다. 외판의 경우 전체 면적을 나누고 내부재의 경우 전체 길이를 나누어 형상에 따른 생산단가를 일반화된 생산단가지수를 구한다.

### 4.2. 외판 생산단가

구조물 외판의 생산단가는 Fig. 19와 같이 미소한 판으로 나누어서 난이도를 측정하고 단가를 산정한다.

$$Cost = C_{ij}(u_i, v_j) \times A$$

( A = 미소면적 ,  $C_{ij}$  = 미소면적의 생산단가 )

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q C_{ij}(u_i, v_j) \cdot \Delta A_{ij}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=i}^q \Delta A_{ij}}$$

( SM = 구조물 외판 총 생산단가지수 ,  $u_i, v_j$  = 미소면적의 중심점 )

미소 판들의 총 단가지수에 전체 면적을 나누어서 구조물 외판 총 생산단가 지

수를 구한다. 구조물의 크기와 상관없이 형상에 따른 생산단가를 구하기 위해 전체 면적을 나누어 생산단가를 일반화하여 생산단가 지수를 산정한다.

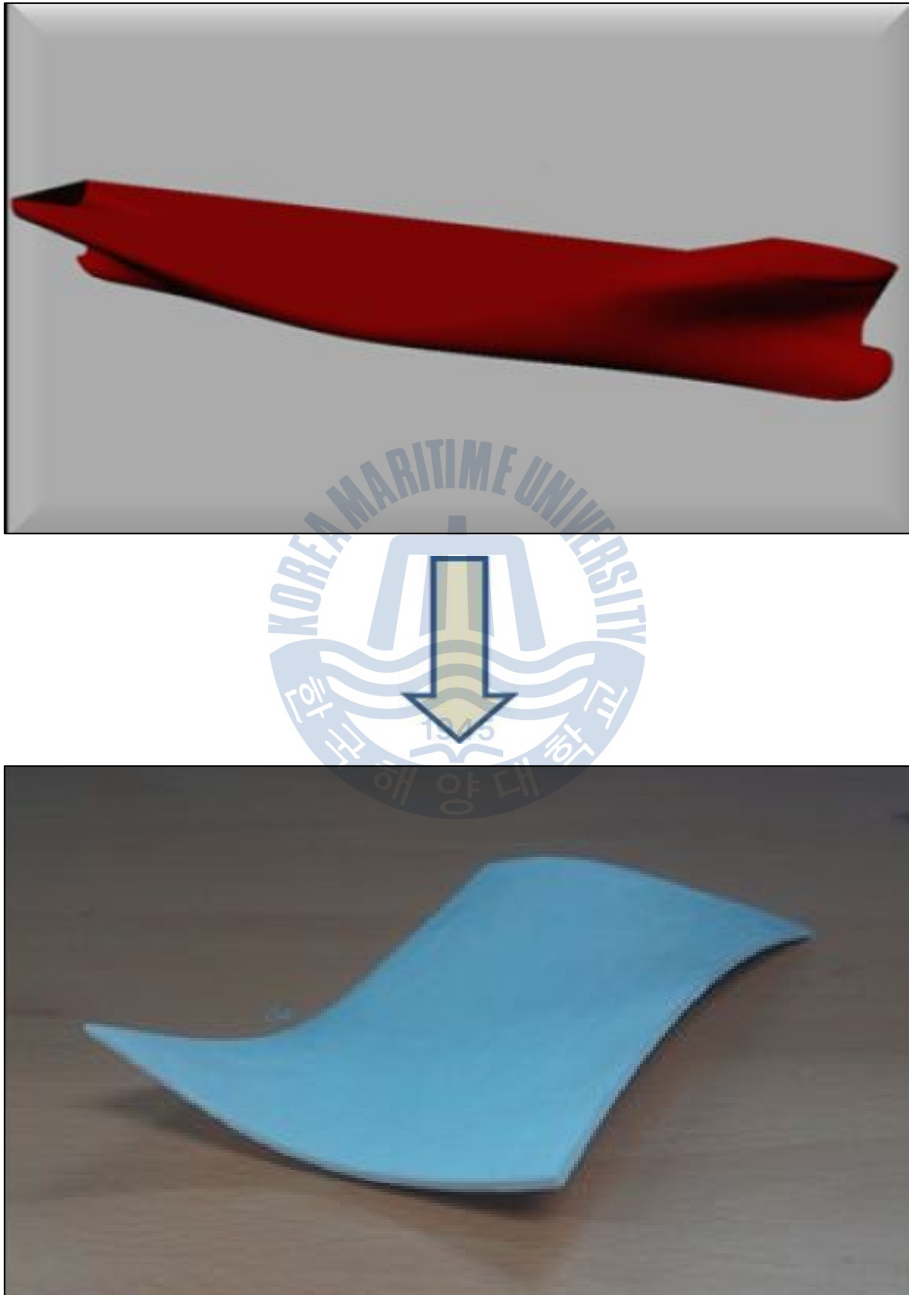


Fig. 19 Converted to an infinitesimal plate

### 4.3. 내부재 생산단가

구조물 내부재는 곡선으로 치환하여 정의하고 치환되어진 내부재의 생산단가는 미소한 곡선으로 나누어서 생산단가를 산정한다.

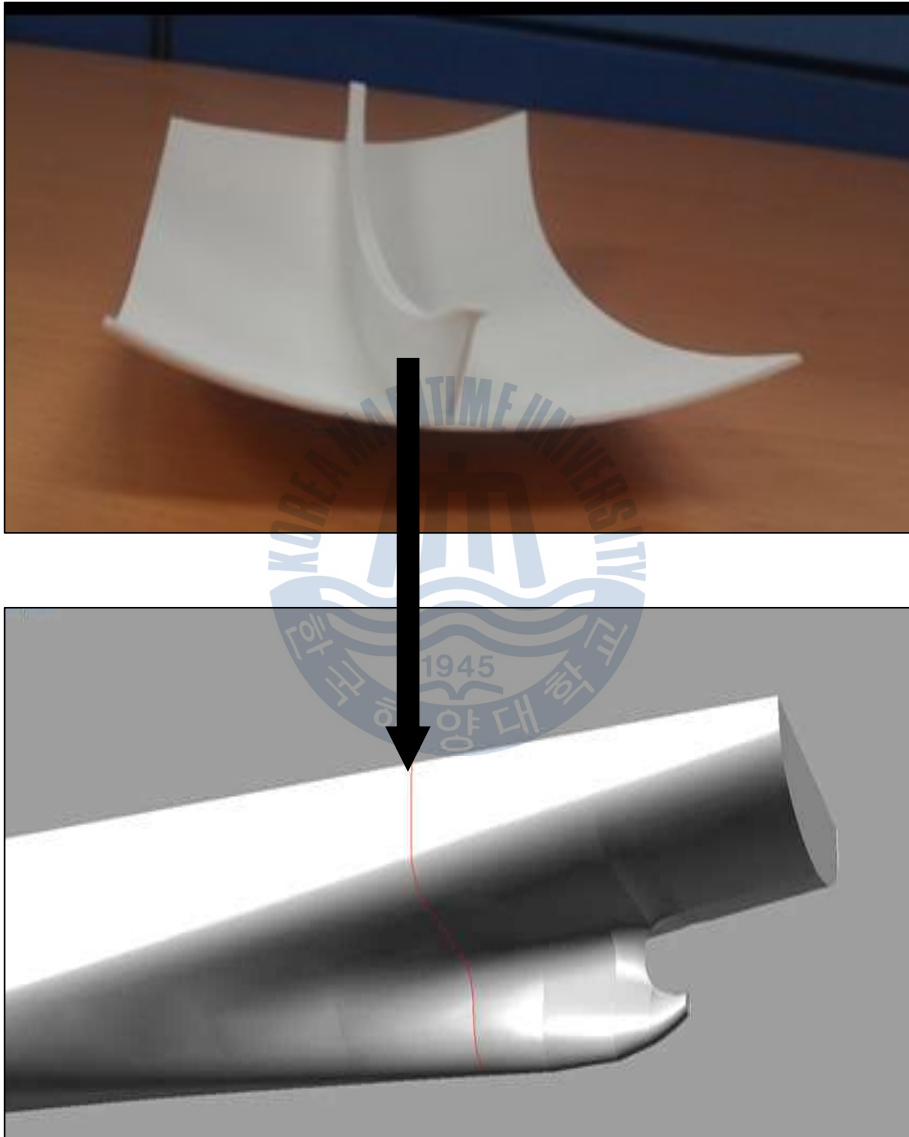


Fig. 20 Replaced by a curve

$$Cost = C_k(t_m) \times L$$

(  $L$  = 미소길이 ,  $C_k$  = 미소길이의 생산단가 )

$$SM_I = \frac{\sum_k C_k(t_m) \cdot L_k}{\sum_k L_k}$$

(  $SM_I$  = 구조물 내부재의 총 생산단가지수 ,  $t_m$  = 미소길이의 중심점 )

미소 곡선의 총 단가지수에 전체 길이를 나누어서 구조물 내부재의 총 생산단가 지수를 구한다. 전체 길이를 나누어 생산단가를 일반화 시켰다. 일반화 시키는 이유는 구조물의 크기와 상관없이 형상에 따른 생산단가를 구하기 위해서이다.



## 제 5 장 생산단가 알고리즘 적용

### 5.1. 개요

현재 대부분의 조선소에서는 대형 구조물과 선박의 기술유출을 막고자 보안이 강화되어 있어 데이터를 수집하는데 어려움이 있다. 현 상황에서 공개되어진 자료와 자문을 통하여 Container Ship의 3차원 모델링을 수행하였다. 본 연구에서는 Container Ship의 기하학적 형상을 이용하여 생산단가 산정 알고리즘에 적용하였고 구조물의 외판과 내부재의 상관관계를 분석하여 다양하게 비교 분석 하였다.

### 5.2. 알고리즘 적용 결과

모델링 정보를 바탕으로 Rhino3D를 이용하여 Container Ship의 3차원 모델링 작업을 수행 하였다. 효과적인 알고리즘 적용을 위해서 가장 형상 변화가 많은 선박의 선수부를 바탕으로 적용하였고, 알고리즘 결과를 비교 및 분석을 위해 Gaussian curvature의 특성을 이용하여 Fig. 20과 같이 외판모델링 (HULL) 정보를 변화시켜 각각 적용 하였다. 모델링 변환은 기존의 모델링에서 Gaussian curvature의 분포도를 바탕으로 좀 더 부드러운 형상으로 변환 하였다. 구조물 외판과 내부재 상관관계에 따름 총생산단가 변화를 비교 분석 하였다.

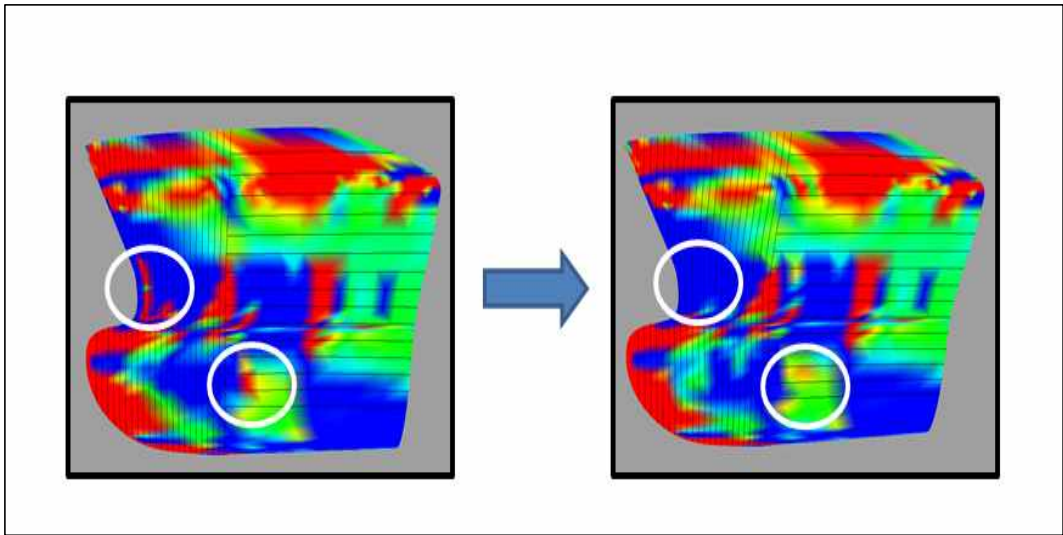


Fig. 21 Changes in 3D geometry

- 형상 변화에 따른 생산단가지수

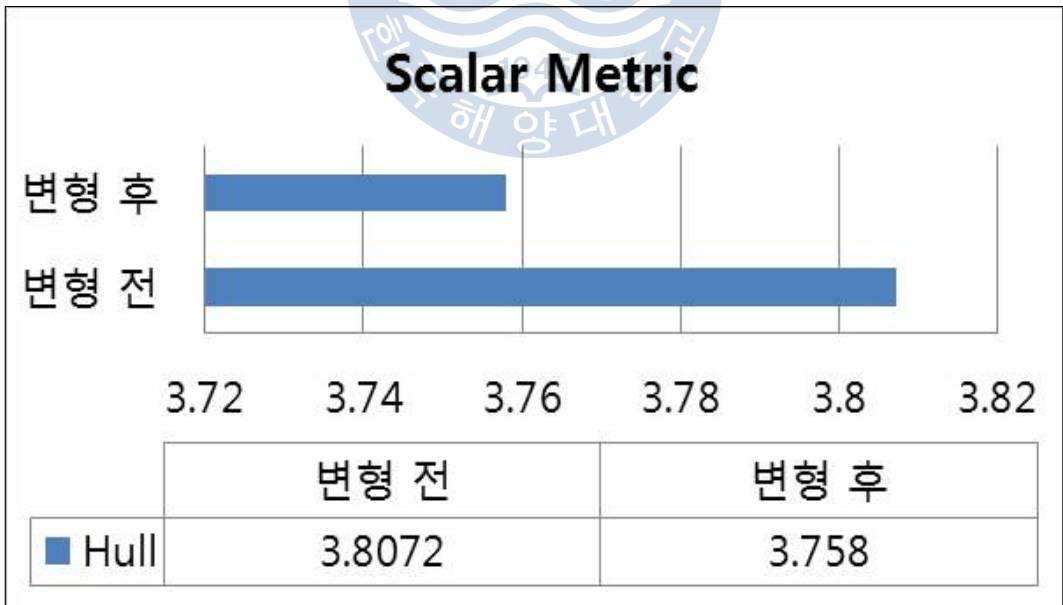


Fig. 22 Hull scalar metric



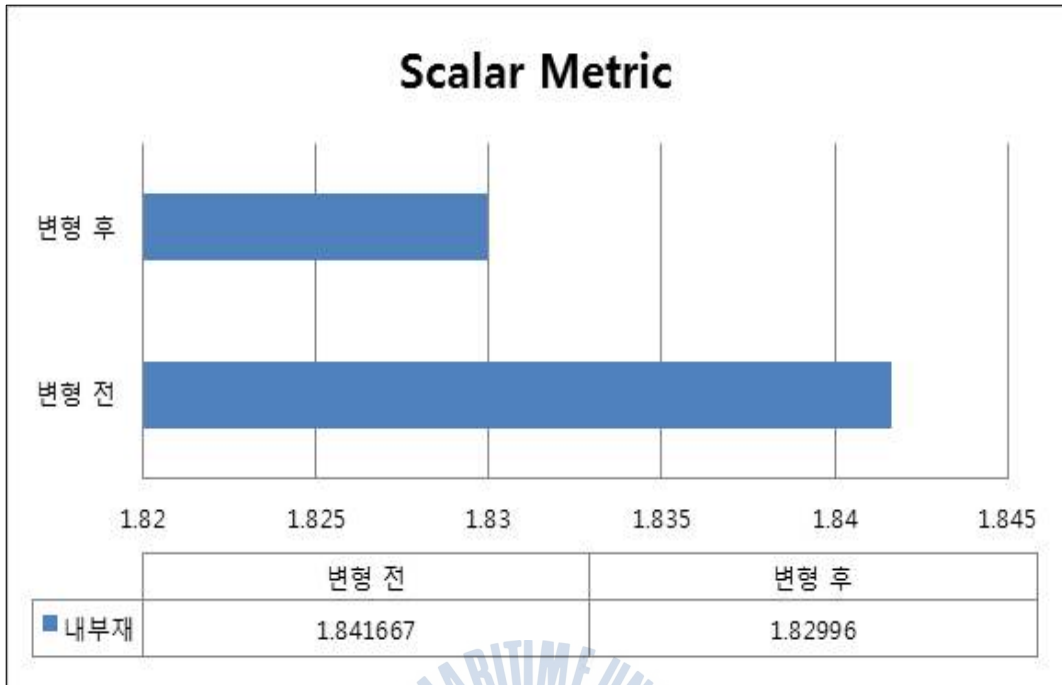


Fig. 23 2-Fold stiffener scalar metric

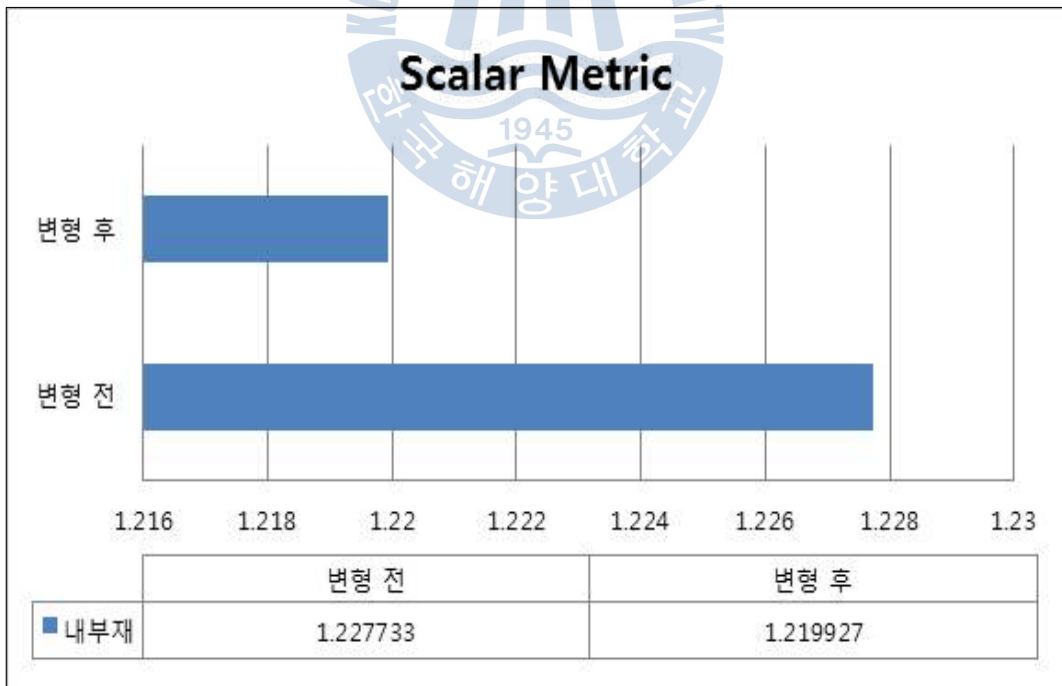


Fig. 24 3-Fold stiffener scalar metric

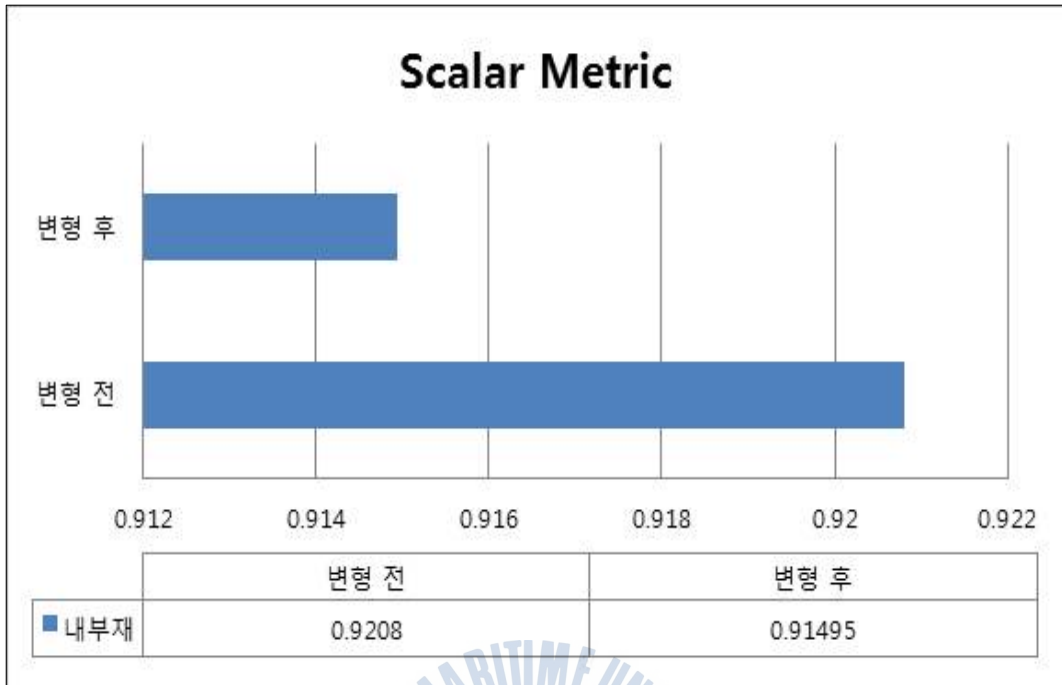


Fig. 25 4-Fold stiffener scalar metric

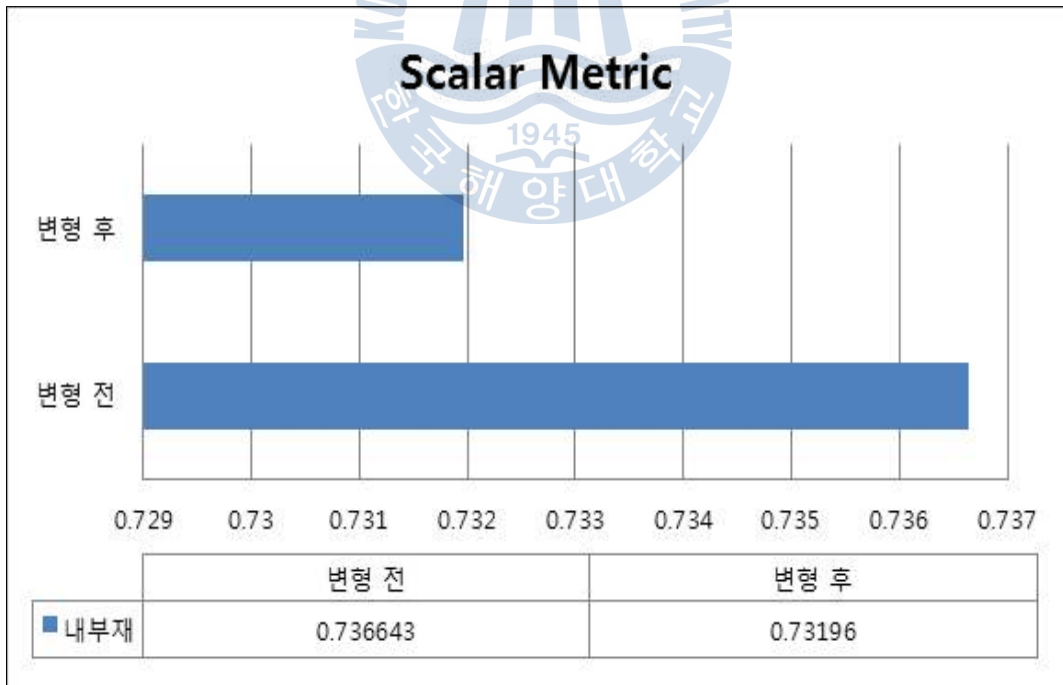


Fig. 26 5-Fold stiffener scalar metric

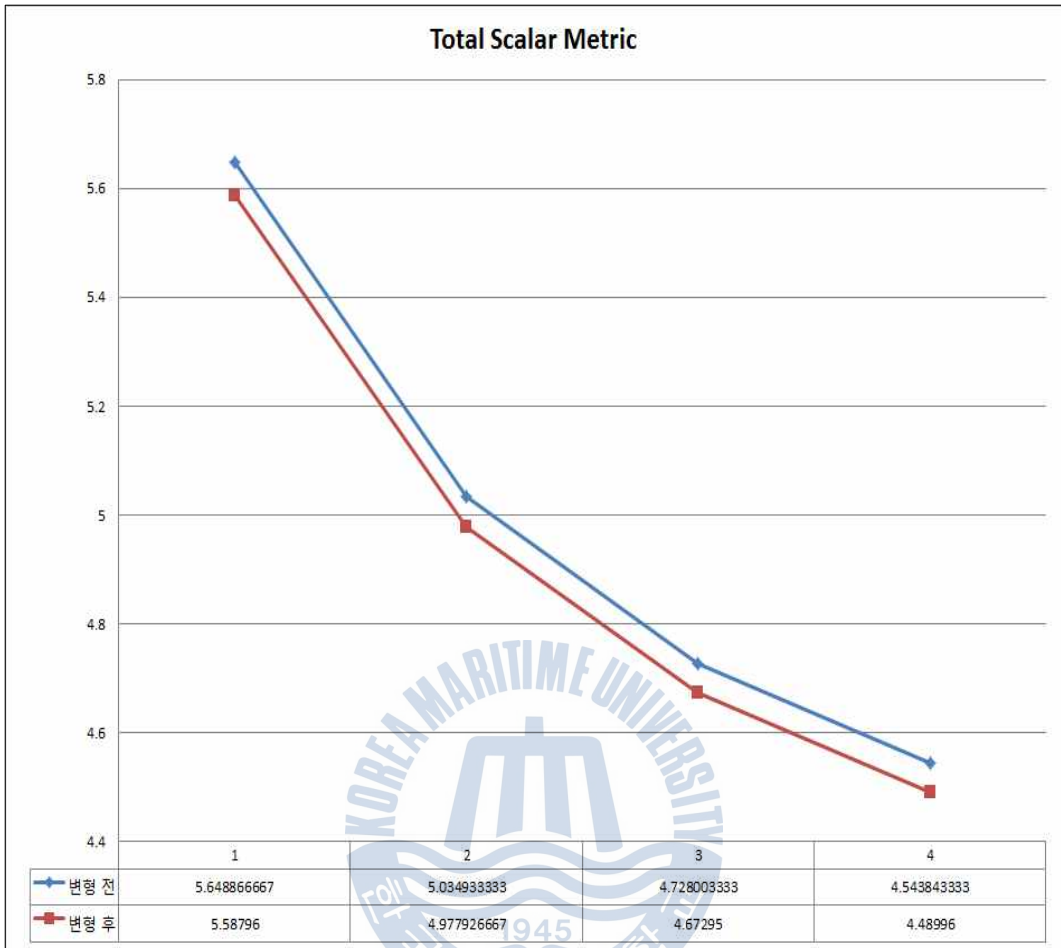


Fig. 27 Total scalar metric

모델링 변화 전과 모델링 변화 후의 생산단가지수를 비교한 결과 모델링을 국부적 수정을 통해 좀 더 부드러운 형상으로 수정 후 생산단가 지수가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

- 생산단가 일반화에 따른 생산단가지수 변화

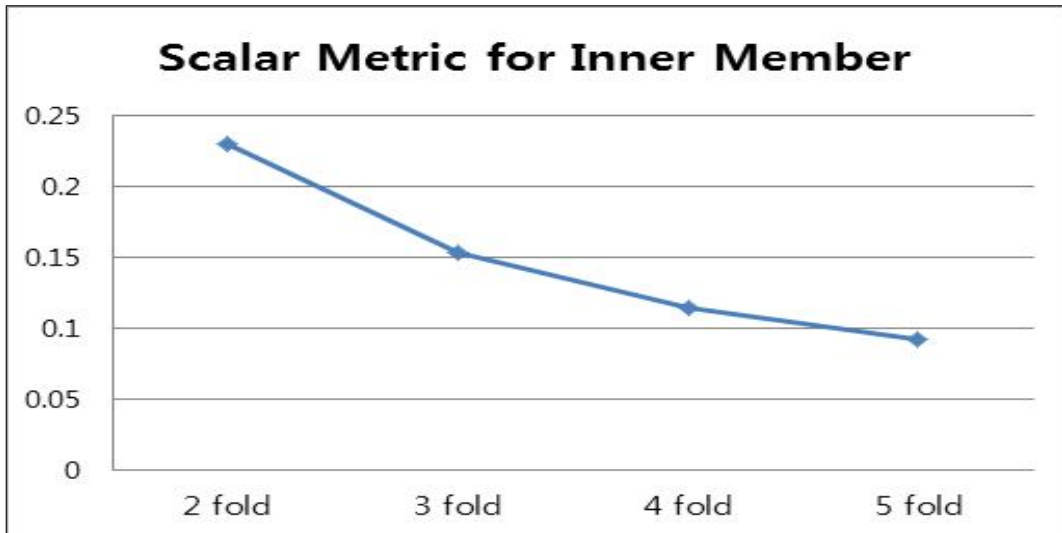


Fig. 28 Stiffener scalar metric changed trend

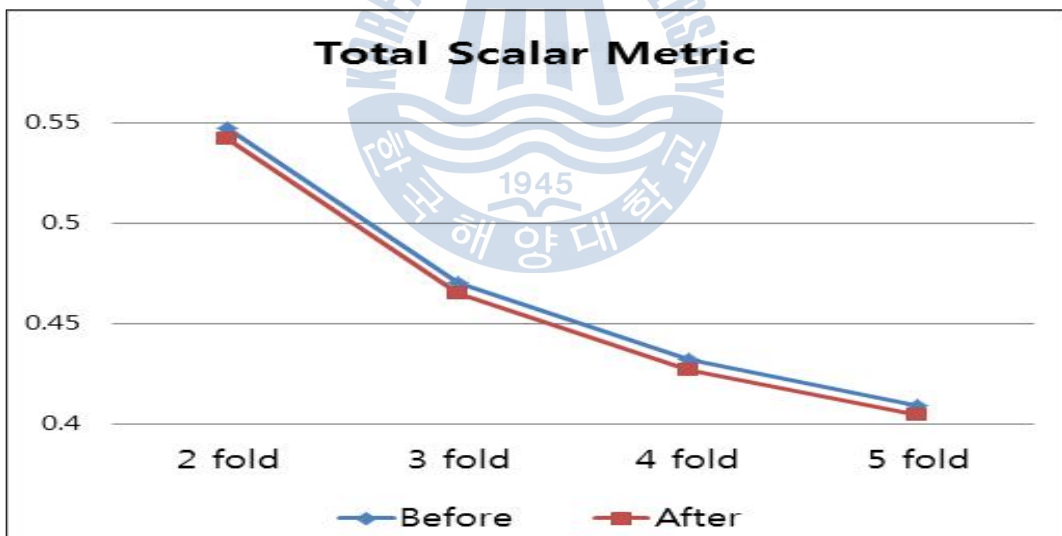


Fig. 29 Total scalar metric changed trend

생산단가 일반화를 통하여 분석한 결과 외판과 내부재의 상관관계에 따라 생산 단가지수가 선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 외판의 형상변화에 따라 내부재의 형상이 변화하고 생산단가지수도 변화하는 것을 확인할 수 있다.

## 제 6 장 생산단가 알고리즘 적용

### 6.1. 연구 결과

입수한 자료와 전문가 자문을 바탕으로 구조물 통합 모델링을 수행하였고 생산난이도 분류와 생산단가를 산정하기 위해 다양한 생산 전문가로부터 데이터를 수집하였고 신뢰도가 높은 단가도표를 완성 하였다. 초기원가지수 모델을 개발하기 위해 NURBS이론을 바탕으로 형상을 정의하는 알고리즘을 완성하였고 생산난이도를 판별하고 생산단가 산정 식을 통해서 생산단가 지수산정 알고리즘을 완성하였다. 최종적으로 모든 알고리즘을 통합하여 초기원가지수 모델을 완성하였다.

### 6.1. 기여도

현재 우리나라 여러 조선소에서 다양한 구조물을 많이 건조하고 있지만 설계를 할 수 있는 기술력은 부족한 상태이다. 이러한 상황에서 구조물의 초기생산단가 산정 알고리즘은 구조물 설계 시 사전 평가할 수 있는 아주 중요한 변수로 활용가능하다. 구조물 설계 시 변수로 활용하여 최적 설계를 하는데 큰 역할을 할 것이다. 그리고 구조물을 건조하기 전 사전에 생산 난이도를 파악하여 사전 준비가 가능하여 효과적이고 경제적인 생산 공정 과정을 만들 수 있게 많은 도움을 줄 것이다. 구조물의 설계기술력을 높이고 초기설계단계에서 사전평가 하는데 중요한 설계변수 역할을 할 것이다.

### 6.3. 향후 과제

본 연구에서는 구조물의 기하학적 형상을 이용하여 외판 및 내부재 제작난이도를 가늠하는 지수를 개발하고 양 지수 간의 상관관계를 분석하여 종합적인 생산단가지수를 정량적으로 도출하였다. 차후 다양한 해양구조물에 생산단가산정 알

고리즘 적용을 통한 신뢰도를 향상시키고 더욱 다양한 변수들을 고려하여 실무에서 사용하는데 신뢰성을 인정받도록 연구를 진행 하겠다.



## 참 고 문 헌

- Parsons, M.G., Nam, J.H., and Singer, D.J., (1999). "A Scalar Metric for Assessing the Producibility of a Hull Form in Early Design," Journal of Ship Production, vol, 15, No.2, May 1999, pp. 91-102
- 노재규 외1명, (2009). "곡가공 프로세스를 고려한 곡판 분류 알고리즘 개발," 대한조선학회논문집 46(6) pp. 675-687
- 김수영 외 2명, (2002). "신경망을 이용한 선박의 곡가공 외판 분류 자동화 개발" 한국 퍼지 및 지능시스템 학회지 제12권 제2호 pp.103-108
- 신용욱 (2004). "인공신경망과 유전적 프로그래밍을 이용한 선체 곡가공 M/H 추정," 석사, 부산대학교
- 이박인 외3명, (2002) "열간가공에 의한 강판의 곡 가공 자동화 시스템" 대한조선학회논문집 제39권 제2호 통권124호 (2002. 5) pp.34-44 1225-1143 KCI 등재
- 강병호 외7명, (2007) "선체 외판 부재의 곡 성형을 위한 가열 계획 생성 휴리스틱" 한국지능정보시스템학회 2007년도 추계학술대회
- 장창두 외3명, (2001) "열간가공에 의한 판의 변형특성에 관한 실험적 연구" 대한조선학회논문집 제38권 제2호 통권120호 (2001. 5) pp.62-70 1225-1143 KCI 등재
- Les Piegl and Wayne Tiller "The NURBS Book "
- 이현찬, 채수원, 최영. <<컴퓨터 그래픽스 및 형상 모델링>>, 디지털 북스

(2006)

- Rhino3. 《Rhinoceros: NURBS modeling for Window》, Robert McNeel & Associates(2003)
- 김용성. 《VISUAL C++ 6 완벽 가이드》, 영진출판사(2002)

