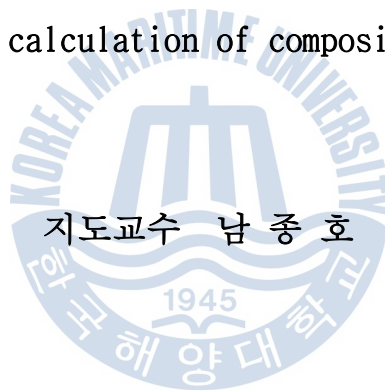


공학석사 학위논문

복합 기하 모델의 체적 산정을 위한
기하학적 해석기법 개발

Development of geometric analysis technique for
volumetric calculation of composite entities



지도교수 남종호

2011년 8월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

강태선

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 조 효 제 (인)

위 원 남 중 호 (인)



2011년 8월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

목 차

List of tables	IV
List of figures	V
Abstract	VIII
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. IGES	6
2.3.1. 개요	6
2.3.2. IGES 포맷의 종류	6
2.3.3. 고정길이 포맷의 구성	7
2.3.4. 주요 형상 엔터티	9
2.4. ACIS	12
2.4.1. 개요	12
2.4.2. 구조	12

2.4.3. ACIS 모델링 기능	13
2.4.4. 형상(Geometry)	16
2.4.5. 위상(Topology)	19
2.4.6. ACIS 기능	23
2.4.7. 활용 방안	25
3. GUI 활용한 시스템 개발	26
3.1. 개요	26
3.2. OpenGL 그래픽스 라이브러리	26
3.3. OpenGL을 이용한 3차원 형상의 표현 기법	27
4. 연구 내용	29
4.1. 개요	29
4.2. 모델링(NURBS)	30
4.3. IGES 포맷 분석	32
4.4. 위상 관계	34
4.5. 알고리즘	36
4.6. 구현	39
5. 결론	44
5.1. 연구 결과	44
5.2. 기여도	44

5.3. 향후 과제 44

참고문헌 46



List of tables

Table 1 Type of Geometry	16
Table 2 Parameter data of IGES surface	33
Table 3 Three cases of 2D merge	34
Table 4 Four cases of 3D merge	35



List of figures

Fig. 1 NURBS surface	4
Fig. 2 Local modification	5
Fig. 3 Intersection point	5
Fig. 4 Structure of IGES file format	8
Fig. 5 B-spline curve entity	10
Fig. 6 Rational B-spline surface entity	11
Fig. 7 Structure of ACIS	13
Fig. 8 Structure of ACIS Class	14
Fig. 9 Relation of ACIS entities	15
Fig. 10 Division of Geometry	17
Fig. 11 Relation of Topology	19
Fig. 12 Loop	21
Fig. 13 Vertex	22
Fig. 14 Rendering process of OpenGL	27

Fig. 15 GUI configuration	28
Fig. 16 Procedure of proposed work	29
Fig. 17 CAD model of AUV	30
Fig. 18 Rendered CAD model of AUV	31
Fig. 19 Recreation of AUV surface	31
Fig. 20 Formula of NURBS	32
Fig. 21 Data format of IGES	33
Fig. 22 Case 1 of 2D	34
Fig. 23 Case 2 of 2D	34
Fig. 24 Case 3 of 2D	34
Fig. 25 Case 1 of 3D	35
Fig. 26 Case 2 of 3D	35
Fig. 27 Case 3 of 3D	35
Fig. 28 Case 4 of 3D	35
Fig. 29 Flow chart of 2D algorithm	37
Fig. 30 Flow chart of 3D algorithm	38
Fig. 31 Result case 1 of 2D	39
Fig. 32 Result case 2 of 2D	40



Fig. 33 Result case 3 of 2D 40

Fig. 34 Result case 1 of 3D 41

Fig. 35 Result case 2 of 3D 41

Fig. 36 Result case 3 of 3D 42

Fig. 37 Result case 4 of 3D 42

Fig. 38 Result AUV 1 of 3D 43

Fig. 39 Result AUV 2 of 3D 43



Development of geometric analysis technique for volumetric calculation of composite entities

Tae-Seon, Kang

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

Abstract

As a preliminary step to figure out the mechanical characteristics of complex geometric models, a method to compute the entire volume and the center of gravity of closed compartments is introduced.

Prompt and efficient calculation of those entities is crucial in controlling the autonomous underwater vehicles where the real-time positioning process is essential for stable maneuvering. In most commercial CAD systems, however, recalculation of such entities should be carried out in a sequential manner whenever the geometric characteristics of a model such as positions and shapes have changed. An automated recalculation process is strongly desired.

To solve the current drawback, the topological relations of models based on their positions are identified. The volume and the center of gravity are computed using various techniques such as surface representation and geometric operation functions. A user friendly

interface that computes the geometric entities and visualizes the operating steps is implemented using the general-purposed graphic library and MFC functions.



제 1 장 서론

1.1. 연구 배경 및 필요성

소형 무인 잠수정과 같은 실시간 안정성이 필요한 모델의 DP(Dynamic position)과 같은 역학적 특성을 계산하기 위해서는 복합 기하 모델의 즉각적인 부피 계산과 부심 계산이 필요하다. 기존 상용 CAD 프로그램을 사용하여 복합체의 부피를 구할 경우 일부 모델의 형상이나 기하학적 위치 변화와 같은 국부 수정 시 즉각적인 재계산을 효율적으로 처리 할 수 없었다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 3차원 곡선 및 곡면을 수학적으로 잘 표현해주는 가장 진보된 곡면 표현 기술인 NURBS(Non-uniform rational B-spline) 이론과 기하연산처림함수를 제공하는 ACIS Library 그리고 프로그래밍 언어를 이용하여 전체 부피와 부심을 구하기 위한 기초 알고리즘을 구현한다. 구현된 알고리즘은 사용자가 쉽게 가시화 할 수 있도록 사용자인터페이스함수(MFC)와 범용 그래픽라이브러리(OpenGL)를 이용하여 GUI 프로그램을 구축 하도록 한다.

1.2. 연구 내용

알고리즘을 구현하기 위해서 곡면표현기술인 NURBS 곡면을 이용하여 모델링을 수행한다. 모델링된 모델 간의 기하학적 위치에 따른 위상 관계를 정리한다. 단순 디자인이 아닌 실제 모델을 제작하기 위한 디자인이므로 모델 간의 위상 관계는 제한 할 수 있다.

모델 간 위상 관계를 확립 하면, NURBS 곡면으로 모델링된 모델의 기하학적 형상 정보가 필요하다. 대부분의 3D CAD 프로그램은 모델의 기하학적 형상 정보를 담기 위한 파일 포맷을 가지고 있으나, 프로그램에 따라 파일 포맷이 다르다. 다행히 대부분의 3D CAD 프로그램에서는 3차원 형상을 저장하고

다른 상호 프로그램과 연동하기 위해 중립 포맷으로 IGES 포맷을 사용하고 있다. IGES 파일은 80개의 ASCII 문자의 레코드로 구성되어 있어 사용할 곡면 표현(NURBS)이론과 표기된 변수들의 의미를 파악하기에 용이하다. 중립 포맷인 IGES 파일에서 모델의 형상 정보를 파악하여 저장하는 알고리즘을 구현 한다.

저장된 형상 정보를 바탕으로 ACIS 라이브러리의 기하연산처리함수와 프로그래밍 언어를 사용하여 전체 부피와 부심을 구하는 알고리즘을 구현한다.

최종적으로 구현된 알고리즘을 사용자인터페이스함수(MFC)와 범용그래픽라이브러리(OpenGL)를 활용하여 사용자가 쉽게 가시화 할 수 있는 GUI 프로그램을 구축한다.



제 2 장 주요 기술에 대한 이론

2.1. 개요

본 연구에서 사용된 주요 기술에 대한 정리이다. 곡면표현기술인 NURBS와 중립 포맷인 IGES파일, ACIS 라이브러리의 데이터 구조, 기하연산처리함수, 그리고 범용그래픽라이브러리(OpenGL)가 연구에 활용 되었으며 이에 대한 기본 이론과 설명 들을 기술 한다. 2장에서 주요 기술들을 정리함으로써 이후 자세한 설명은 하지 않도록 한다. NURBS와 IGES파일 포맷, ACIS 라이브러리는 주요 연구에 모두 활용 되었고, 3장에서 사용된 MFC와 OpenGL 그래픽스 라이브러리에 대한 설명은 해당 장에서 간단히 설명하도록 한다.

2.2. NURBS

NURBS는 Non-uniform rational B-spline의 약자로 3차원 곡선 및 곡면을 수학적으로 표현 하는 방식들 중에서 가장 진보된 방식이다. NURBS는 Fig.1 과 같이 조정점(Control point 또는 Control Vertex)이라고 불리는 제어점을 이용하여 곡선 또는 곡면을 제어 한다. 현재 많은 상용 CAD 프로그램(3D MAX, Rhino 3D, Maya)과 같은 소프트웨어서 공통적으로 사용되고 있다.

● NURBS의 특징

NURBS는 조정점(Start)과 마지막 조정점(End)은 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 꺾질 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.

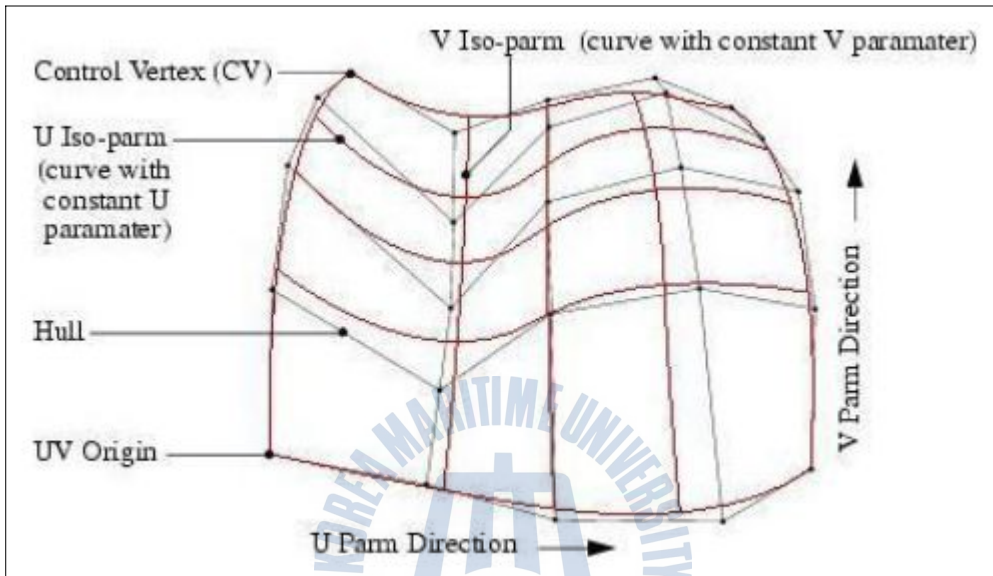


Fig. 1 NURBS Surface

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.

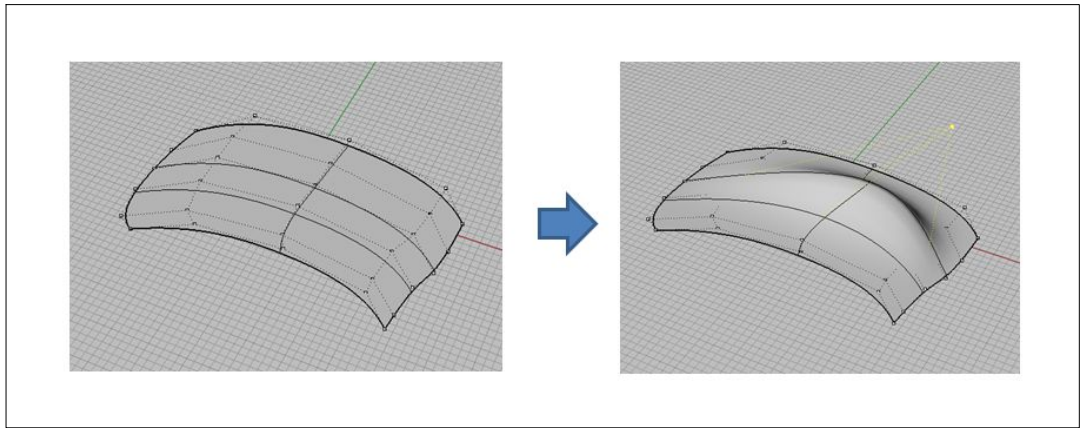


Fig. 2 Local modification

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.

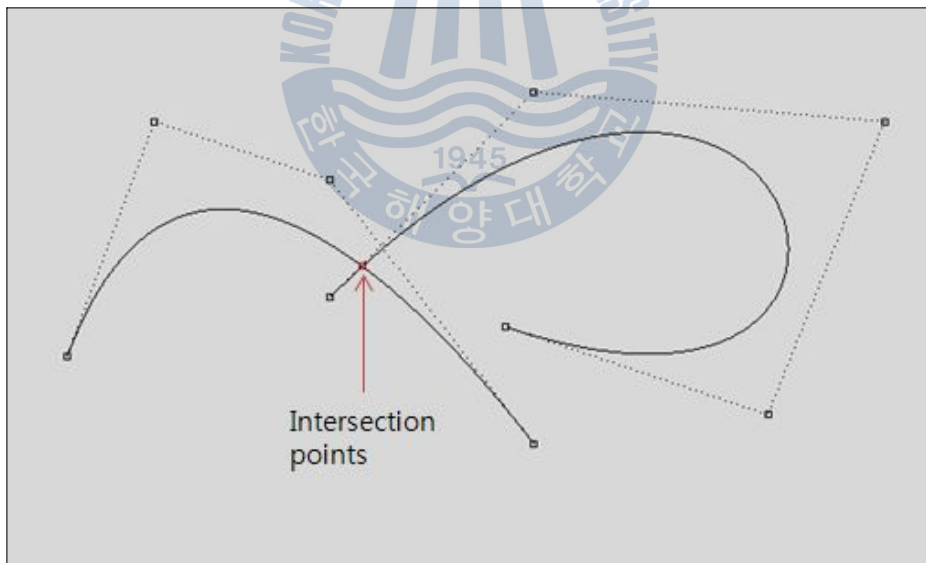


Fig. 3 Intersection point

NURBS에 대한 보다 자세한 사항은 참고문헌(Piegl and Tiller, 1997; Rogers, 2001)을 참고한다.

2.3. IGES

2.3.1. 개요

IGES(Initial Graphics Exchange Specification)는 1980년대 미국 상무성의 국가표준국(NBS, National Bureau of Standards)에서 만들어진 그래픽 정보의 교환을 위한 미국의 표준 규격으로 제품의 정의 데이터의 수치적 표현 및 교환을 위한 정보구조를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다. IGES에서 표현하는 데이터의 기본 단위를 엔터티(entity)라고 하는데, 엔터티는 geometry, annotation 및 structure 엔터티의 3가지 영역으로 나뉜다. geometry 엔터티는 curve, surface 및 solid를 표현하며, annotation 엔터티는 지시선, 치수, 심벌, 단면도 등의 도면 정보를 나타낸다. 그리고 structure 엔터티는 문자의 크기, line의 굵기, 색상의 정의, grouping 관계, FEM(Finite Element Model)의 요소 등을 나타낸다. neutral 파일을 이용한 이기종간 형상 데이터의 교환을 위한 수단으로, 다른 어떤 파일 형식보다도 널리 사용되고 있어 실질적인 세계표준이라 볼 수 있다.

2.3.2. IGES format의 종류

IGES 파일 format은 ASCII format과 Binary format 두 가지로 크게 분류되며, ASCII format은 고정 길이 포맷(fixed line length format)과 압축 포맷(compressed format)으로 나뉜다. Binary format은 ASCII format을 이진 비트열로 표현한 것이다. 데이터는 사용자의 전송 프로토콜 선택에 의해 비트열 데이터 형태로 전송될 수 있다. 압축 포맷은 IGES 파일의 크기가 문제될 때 이를 축소하기 위해 개발 되었으며, 이 포맷은 Directory Entry 섹션과 Parameter Data 섹션이 결합되어 단일 섹션을 이루고 있는 것이 특징이다. 고정길이 포맷은 80칼럼으로 이루어진 줄 단위로 데이터를 기록하는데, 파일의

크기가 크다는 단점이 있지만 가장 많이 쓰이고 있는 포맷이다. NURBS에 필요한 파라미터 값을 직관적으로 얻기 위해 고정길이 포맷을 이용하였다.

2.3.3. 고정길이 포맷의 구성

고정길이 포맷은 그림에서 보는 바와 같이 다섯 개의 섹션으로 구성되어 있는데 1칼럼부터 72칼럼까지는 섹션별로 각종 정보가 기록되어 있고 73칼럼까지는 섹션별로 각종 정보가 기록되어 있고 73칼럼에는 각 섹션을 구분해 주는 문자(S, G, D, P, T)가 위치하며 74칼럼부터 80칼럼까지는 섹션의 순차번호가 나열된다.

(1) Start 섹션

start 섹션은 사용자가 읽을 수 있는 주석을 기록하는 부분이다. 파일명, 작성자 등 필요한 내용을 임의로 기록할 수 있으며, 최소한 하나의 레코드가 존재해야 한다.

(2) Global 섹션

Global 섹션은 전처리기(Pre-processor)와 같은 후처리기(Post-processor)에 필요한 시스템 대한 정보를 기록하는 부분으로 파라미터는 자유 형식으로 기재된다. 이 섹션은 파일명, 파일 작성일시, 작성자, 실수형의 지수 자릿수 및 유효 자릿수, 최대 선폭, IGES 버전 등 총 24개의 파라미터로 구성된다.

(3) Directory Entry 섹션

파일에 기록되어 있는 모든 엔터티들에 대한 색인을 제공하고 이들 엔터티에 대한 속성정보를 나타낸다. 8칼럼으로 된 20개의 필드에는 엔터티 번호, PD색

선에 대한 포인터, 선의 종류와 폭, 그리고 색상 등이 기록되며, 10개의 필드가 한 줄을 구성하므로 두 개의 줄이 하나의 디렉터리를 구성한다.

(4) Parameter Data 섹션

DE섹션에 기록된 엔터티들에 대하여 엔터티 번호, 3차원 좌표값, 엔터티의 속성을 참조하는 포인터 등이 기록되며, 여러 엔터티들이 상호 논리적으로 결합되어 있는 경우에는 연관관계 또는 비형상 수치정보를 나타내는 엔터티를 참조하는 포인터가 기록되기도 한다.

(5) Terminate 섹션

이 섹션은 한 줄로 구성되며 8칼럼으로 된 10개의 필드로 나뉘어져 있다. 위의 4개의 섹션에 대한 섹션 구분문자와 줄 수가 기록된다.



Fig. 4 Structure of IGES file format

2.3.4. 주요 형상 엔터티

IGES 포맷에서 지원 되는 형상 엔터티의 종류는 매우 다양하나, area나 volume을 결정하는데 필요한 주요 형상은 다음과 같다.

(1) Rational B-spline curve entity(Type 126)

$$R(t) = \frac{\sum_{i=0}^k N_{M+1,i}(t)W(i)P(i)}{\sum_{i=0}^k N_{M+1,i}W(i)b_i(t)} \quad M=\text{Degree of basis function}$$



순서	이름	수형	의미	비고
1	K	정수	Upper index of sum	①곡선식 참조
2	M	정수	Degree of basis function	①곡선식 참조
3	PROP1	정수	0: Non-Planar, 1: Planar	
4	PROP2	정수	0: Open Curve, 1: Closed Curve	
5	PROP3	정수	0: Rational Curve 1: polynomial	
6	PROP4	정수	0: Non-Periodic 1: periodic	
7 7+A	T(-M) T(N+M)	실수	Knot Sequence	N=K-M+1 A=N+2M (K+M+2)개
8+A 8+A+K	W(0) W(K)	실수	Weights	(K+1)개 ①곡선식 참조
9+A+K 11+A+4K	V _i	실수	Control Points	3(K+1)개 ①곡선식 참조
12+A+4K 13+A+4K	V(0) V(1)	실수	Starting Parameter Value Ending Parameter Value	
14+A+4K	XNORM	실수	Unit Normal(X value)	PROP1 = 1 일 때만 해당됨
15+A+4K	YNORM	실수	Unit Normal(Y value)	
16+A+4K	ZNORM	실수	Unit Normal(Z value)	

Fig. 5 B-spline Curve entity

(2) Rational B-spline surface entity(Type 128)

$$G(s, t) = \frac{\sum_{i=0}^{K1} \sum_{j=0}^{K2} N_{M1+1,i}(u) N_{M2+1,j}(v) W(i,j) P(i,j)}{\sum_{i=0}^{K1} \sum_{j=0}^{K2} N_{M1+1,i}(u) N_{M2+1,j}(v) W(i,j)}$$

M=Degree of basis function

-구성 데이터

순서	이름	수형	의미	비고
1	K1	정수	Upper index of first sum	①곡면식 참조
2	K2	정수	Upper index of second sum	①곡면식 참조
3	M1	정수	Degree of first set of basis function	①곡면식 참조
4	M2	정수	Degree of second set of basis function	①곡면식 참조
5	PROP1	정수	0: Not Closed 1: Closed in first parametric variable direction	
6	PROP2	정수	0: Not Closed 1: Closed in second parametric variable direction	
7	PROP3	정수	0: Rational 1: polynomial	
8	PROP4	정수	0: Non-Periodic in first parametric variable direction 1: periodic in first parametric variable direction	
9	PROP5	정수	0: Non-Periodic in second parametric variable direction 1: periodic in second parametric variable direction	
10	S(-M1)	실수	First Knot Sequence	$N1=K1-M1+1$ $A=N1+2M1$ (K1+M1+2)개
10+A	S(N1+M1)			
11+A	T(-M2)	실수	Second Knot Sequence	$N2=K2-M2+1$ $B=N2+2M2$ (K2+M2+2)개
11+A+B	T(N2+M2)			
12+A+B	W(0,0)	실수	Weights	$C=(K1+1) \times$ (K2+1)개 ①곡면식 참조
13+A+B	W(1,0)			
...	...			
11+A+B+C	W(K1,K2)			
12+A+B+C	V_{ij}	실수	Control Points	3C개 ①곡면식 참조
11+A+B+4C				
12+A+B+4C	U(0)	실수	Starting Value for first parametric direction	
13+A+B+4C	U(1)	실수	Ending Value for first parametric direction	
14+A+B+4C	V(0)	실수	Starting Value for second parametric direction	
15+A+B+4C	V(1)	실수	Ending Value for second parametric direction	

Fig. 6 Rational B-spline surface entity

2.4 ACIS

2.4.1. 개요

ACIS는 케임브리지 대학 BUILD의 멤버인 Allen Grayer, Charles Lang, Ian Braid에 의해 개발 되어 Spatial Technology사를 중심으로 상업화 된 형상 모델링 커널로서, 형상 모델링 분야의 전문가들이 상당한 시간을 소요하여 개발한 것으로 1989년 처음 소개 되었다.

형상 모델링에 필요한 기능을 라이브러리 형태로 제공하며 응용프로그램에서 접속할 수 있도록 하는 API(Application representation) 모듈을 가지고 있다. ACIS는 3차원 B-rep(boundary representation) 모델러이다. 이를 곡면 모델(Surface Model)이라고 하는데, 물체 곡면의 형상 정보와 곡면 구성 요소간의 관계로 표현하는 모델을 말한다. 즉, 물체의 곡면을 이루는 면(Face), 모서리(Edge), 정점(Vertex)들의 그래프 구조로 물체를 표현한다.

2.4.2. 구조

B-rep에서는 물체가 면의 집합으로, 면이 루프(Loop - 서로 연결되어 고리 형태를 가지는 모서리들의 집합)의 집합으로 나타내어지며, 루프는 다시 모서리들의 집합으로, 모서리는 두 개의 정점으로 나타내어지는 관계를 나타낸다. 여기에 추가하여 면, 모서리, 정점들이 서로 어떻게 연결되었는지를 나타내는 인접 관계(Adjacency Relationship)가 사용된다.

ACIS는 와이어 프레임(Wire frame)모델링, 곡면 모델링, 솔리드 모델링이 가능하도록 데이터 구조가 이루어져 있고, ACIS에서 표현되는 body는 이것들 중의 어떤 형태를 가질 수 있으며, 이들을 복합한 형태를 가질 수도 있다. 이와 같은 비다양체(Non-manifold)물체를 ACIS에서는 표현할 수 있다.

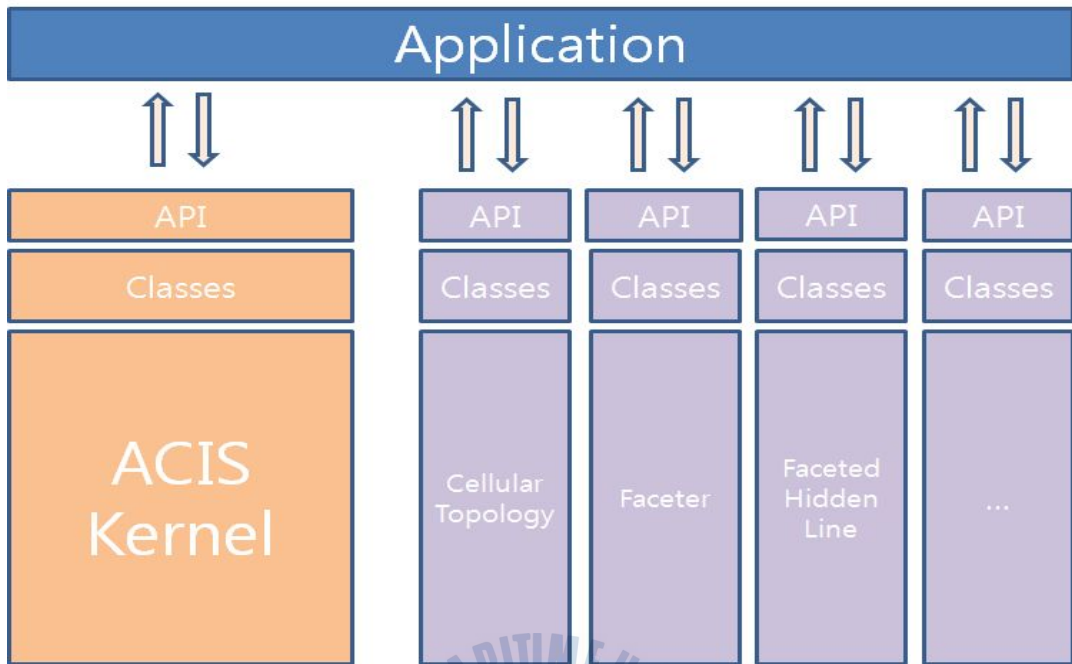


Fig. 7 Structure of ACIS

2.4.3. ACIS 모델링 기능

솔리드 모델러가 곡면 모델러나 와이어프레임 모델러와 구분할 수 있는 것은 한 점이 체적이 내부에 있는지 외부에 있는지, 또는 그 경계에 있는지를 결정할 수 있는 능력이다. 이런 개념을 경계 표현(Boundary Representation)이라고 하는데, 형상(Geometry) 클래스를 설계하는데 기본이 된다. 이러한 표현은 특정 조건하에서 현상이나 물질의 특성 또는 행동에 대하여 결정할 수 있도록 해준다.

ACIS는 객체 지향 언어인 C++로 작성되었으며 C++ 클래스 메커니즘을 이용하여 데이터 구조에 직접 접근할 수 있다. 개념적인 ACIS 모델은 Fig. 8과 같이 C++ 클래스 계층구조로 구현된다.

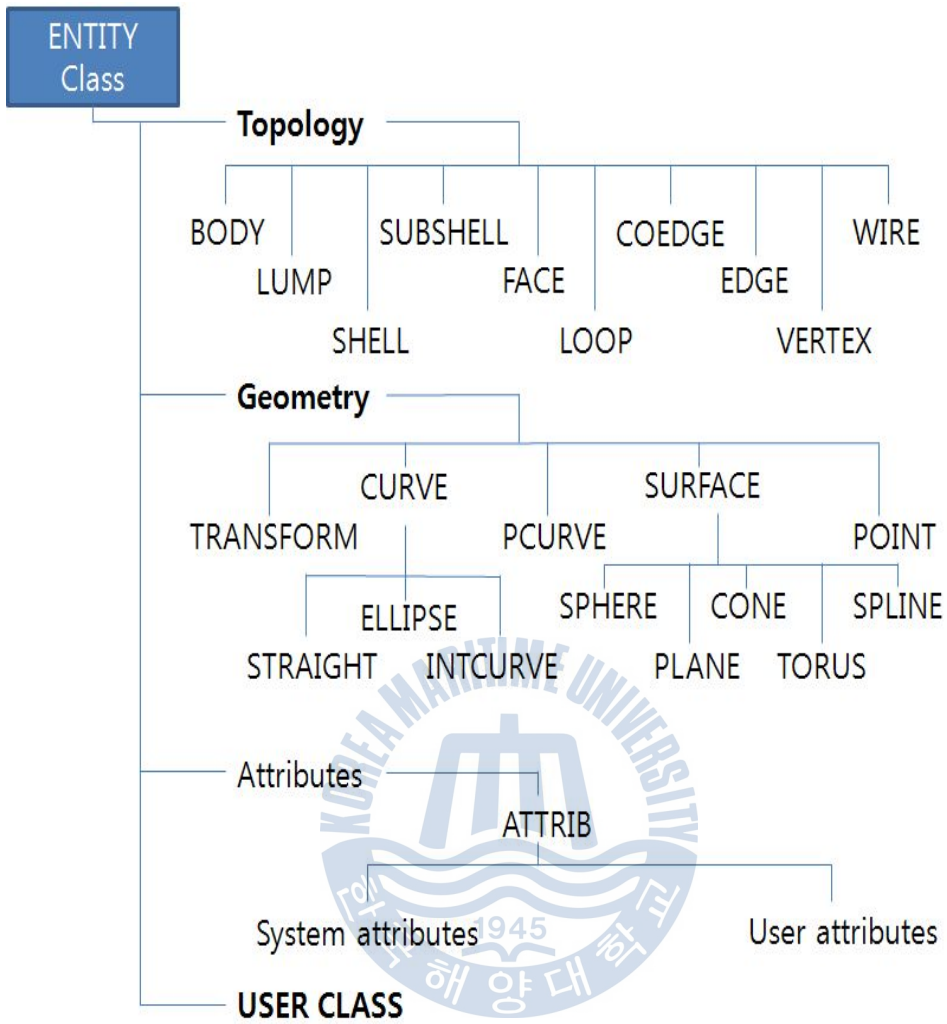


Fig. 8 Structure of ACIS Class

ACIS는 솔리드와 sheet body를 여러 개의 클래스로 나누어 표현한다. 이 클래스들은 경계 표현 솔리드 모델러를 위한 데이터와 방법들을 제공한다. 솔리드와 sheet body는 Fig.9와 같이 구현 할 수 있다.

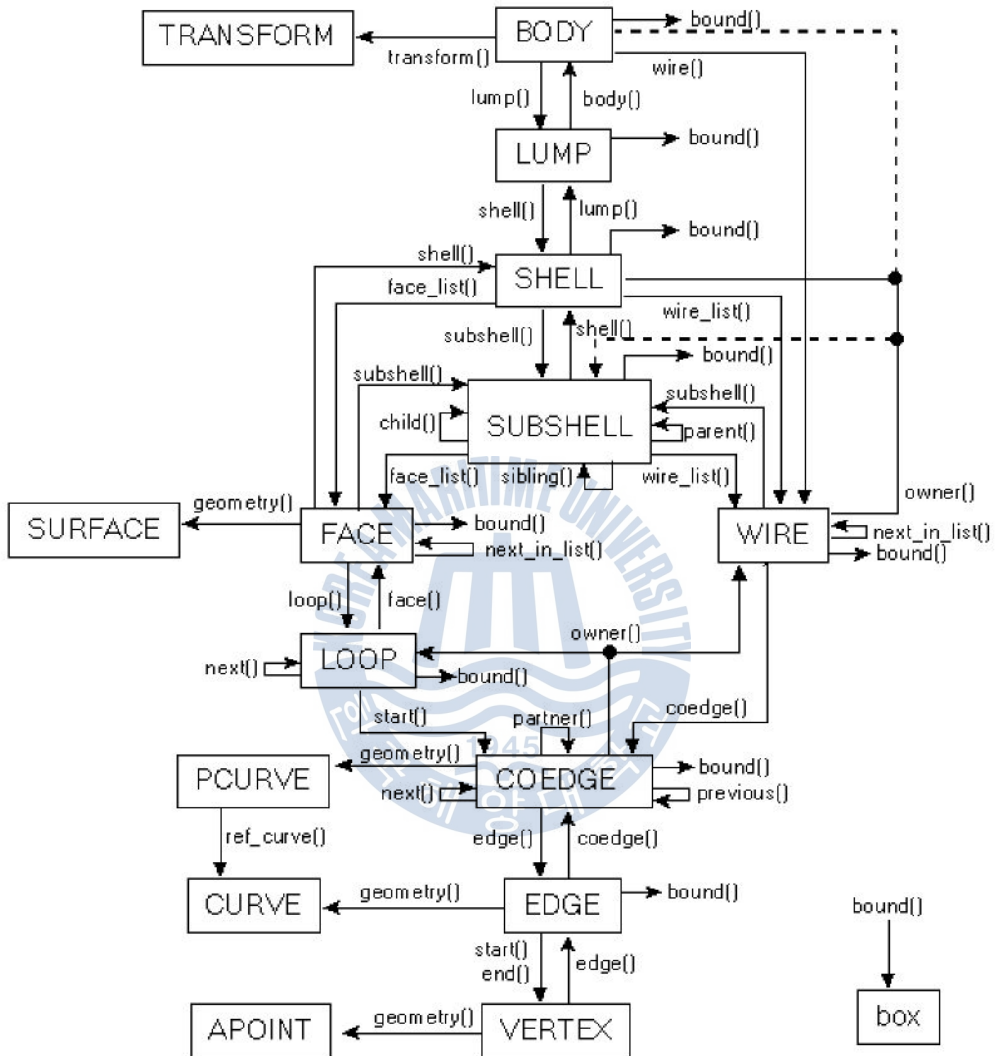


Fig. 9 Relation of ACIS entities

2.4.4. 형상(Geometry)

형상은 점, 곡선, 곡면, 그리고 직선, 구, 평면, 토러스(Torus), 원뿔 등의 모델에 의해 나타나는 물리적인 표현이다. 3차원 물체-공간에서 곡선의 클래스는 직선, 타원과 같은 특별한 곡선들을 위한 클래스와 평면, 뿔, 구, Spline 곡면들을 위한 클래스도 포함한다. 또한 2차원 parametric 공간상의 곡선을 정의한 Pcurve 클래스도 있다.

Table. 5 Type of Geometry

형상	내용
Point	Point는 점에 대하여 정점의 개수와 좌표 값 가짐.
Curve	Curve는 곡선에 대하여 연결된 모서리의 개수를 기록하고, 곡선, 타원(원 포함), Spline 곡선(Interpolated Curve) 중에서 해당 곡선의 경로 가짐.
Pcurve	Pcurve - Pcurve는 곡선으로 표현되는 공통 모서리(Coedge)를 곡면 위에 매개 변수화 하여 나타낸 것이다. 또한 Pcurve를 매개 변수(Parameter) 공간상의 곡선이나, 곡면 매개 변수 곡선이라고도 함.
Surface	Surface는 곡면에 대하여 면의 개수를 기록하고 평면, 타원형, 원뿔(원통과 뿔 포함), 구, Tori, Spline중에서 해당 곡면의 경로를 가짐.
Transform	TRANSFORM 클래스는 모든 Body의 객체 공간 변환을 포함하고 있다. Transform은 affine_part, translation_part, scaling_part, rotate_flag, reflect_part, shear_flag로 구성 되어있다

아래는 ACIS 모델을 구성하는 형상을 개념적으로 구분해 놓은 것이다.

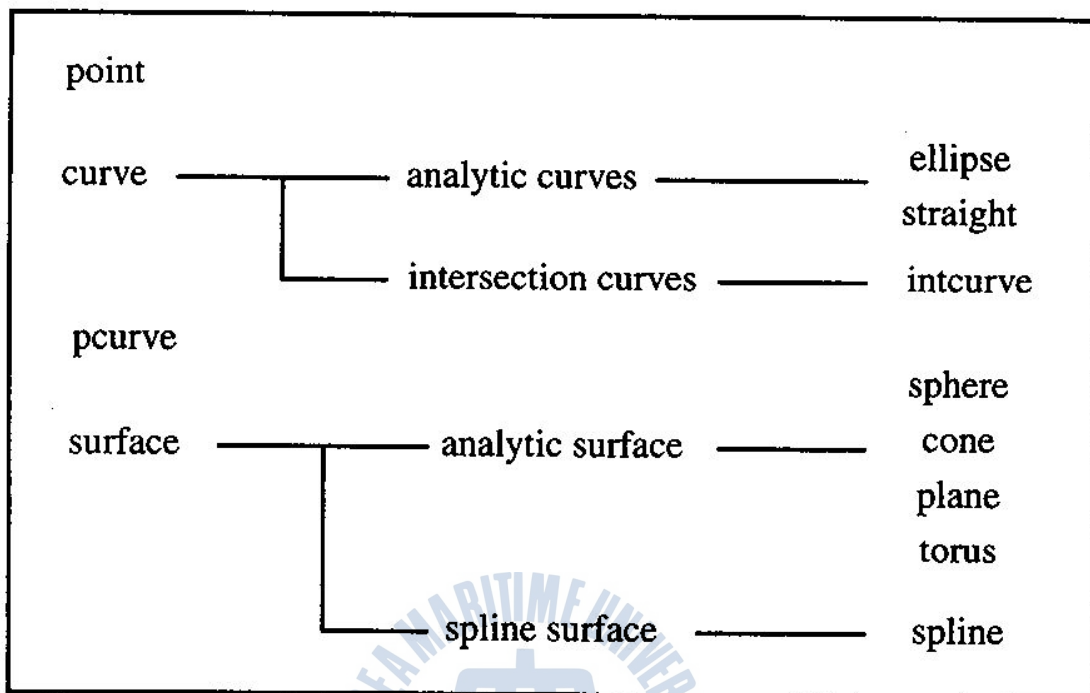


Fig. 10 Division of Geometry

ACIS의 모든 형상을 설명하기에는 무리가 있기 때문에 논문에 활용된 Pcurve에 대해 설명하고 자세한 내용은 (Jonathan Corney, 2001) 참고 한다.

(1) Pcurve

ACIS는 곡선과 곡면 형태의 표현을 위해 3개의 클래스를 제공한다.

- bs3_surface는 Spline 곡면에서 유도한 곡면으로 표현한다. 이런 표현이 NURBS(Non Uniform Rational B-Splines) 형태이다. 새로운 곡면을 Spline 클래스에서 유도하여 생성한다면, 최소한 근사화 된 bs3_surface를 계산 할 수 있는 방법을 제공해야 한다. 이 의미는 bs3_surface를 ACIS에서 정의된

Spline 곡면으로 표현하는 것이 정확하지 않을 수 있다는 것이다.

- bs3_curve는 Intcurve곡선에서 유도된 곡선으로 표현된다.

- bs2_curve는 2차원이라는 것만 제외 하면, bs3_curve와 동일하다.

PCURVE 클래스는 ENTITY클래스로부터 직접 유도된다. PCURVE는 면에 있는 공통 모서리(Coedge)의 형상 정보를 기록한다. Spline 곡면 위에 놓인 면의 각 모서리는 PCURVE를 참조해야만 한다. PCURVE를 매개 변수화 하는 것은 3차원 곡선을 매개 변수화 하는 것과 유사하다.



2.4.5. 위상(Topology)

다음 그림은 ACIS 모델을 구성하는 위상을 개념적으로 나타낸 것이다. Body는 와이어(Wire) Body와 솔리드 또는 쉬트(Sheet)Body로 구분할 수 있다. 위상은 다양한 형상 실체(Entity)들 사이의 공간적인 관계를 타나내며, body, wire, lump, shell, subshell, face, loop, coedge, edge 그리고 vertex 클래스로 표현한다.

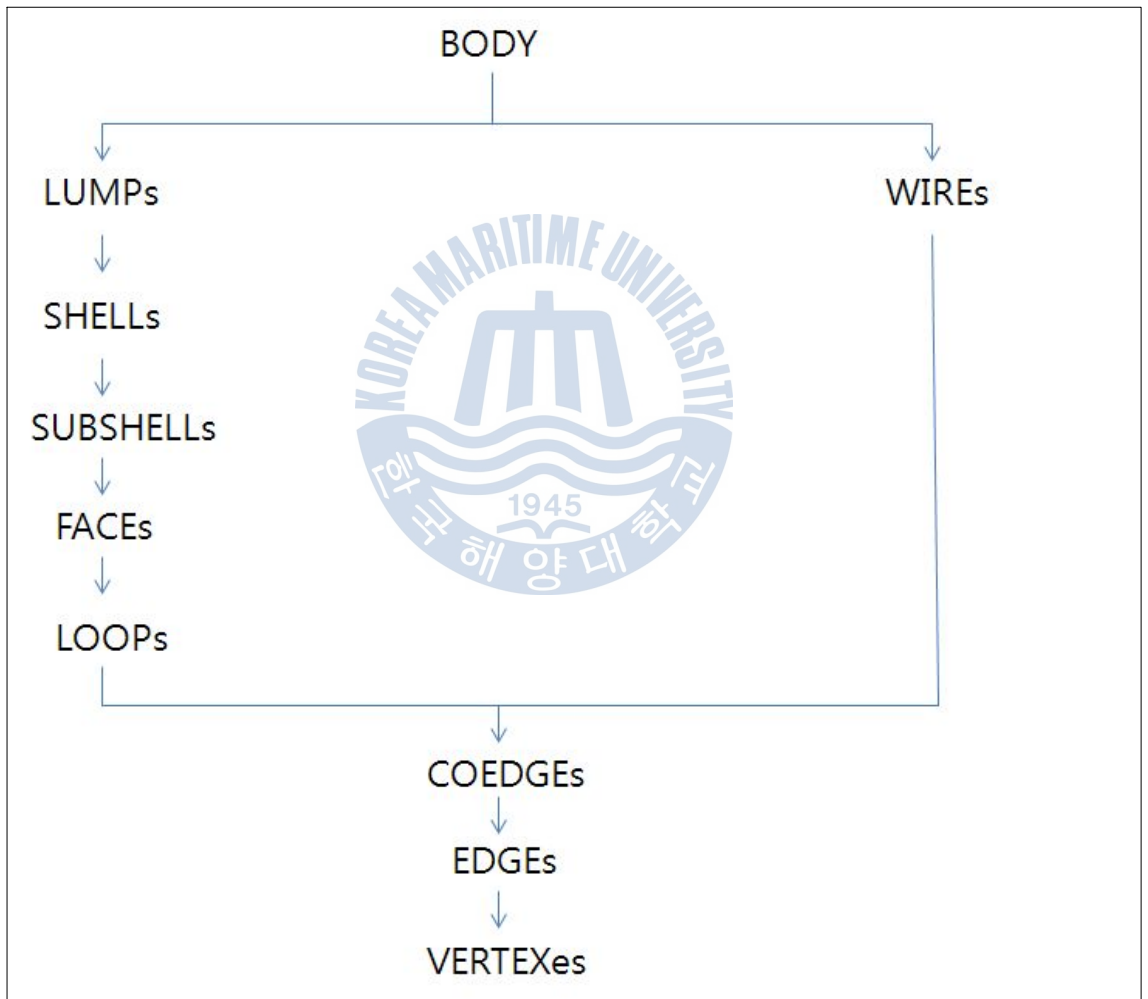


Fig. 11 Relation of Topology

(1) Wire

Wire는 모서리와 정점들을 연결한 것이다. 보통 Wire는 윤곽, Sweep 한 형태의 중심선 등을 나타낸다. 오직 Wire를 포함하고 있는 Body를 Wire Body라고 한다.

(2) Lump

Lump는 연결된 3차원 (Solid)이나 2차원 (Sheet) 영역으로 표현된다. Body는 하나 이상의 Lump를 포함하거나, 없을 수도 있다. 각 Lump는 떨어진 점들의 집합으로 표현된다. 하나의 Lump는 다른 솔리드 Lump의 비어있는 공간 내부에 완전히 포함되어야 한다. 또한 각 Lump는 최소한 하나의 Shell을 가져야만 한다.

(3) Shell

Shell은 연결된 면들의 한 집합을 의미한다. 면은 모서리나 정점들을 따라 연결되어 있다. 또한 Shell은 하나의 쉬트 영역이나, 솔리드 영역의 경계로 표현된다.

(4) Subshell

ACIS는 Shell을 Subshell의 계층구조와 면으로 그룹화 한다. Subshell은 직접 인터페이스(Direct Interface)에 의해서 모델을 다루는 응용에만 적용되고, API를 통한 모델은 다룰 수 없다.

(5) Face

Face는 Body와 유사하게 2차원 공간상에서 하나의 형상 곡면을 말한다. 면에서의 Loop는 닫혀 있지 않을 수도 있다. 하나의 Loop는 한 개의 직선 모서

리로 이루어 졌다고 본다. 만약 모서리의 양 끝이 무한(Infinite)이라면, 면도 무한이다. Loop가 없는 면은 곡면 전부를 가리킨다. 따라서 한 면은 무한 평면이나 완전한 구를 말한다.

(6) Loop

Loop는 한 면의 경계가 연결된 부분을 말한다. 하지만 Loop는 닫혀 있지 않을 수도 있다. 심지어 Loop는 하나의 정점으로 줄어든 모서리로 표현한다. Fig. 12는 3개의 닫힌 Loop를 보여주며, 각 Loop는 유한한 면의 경계 이다.

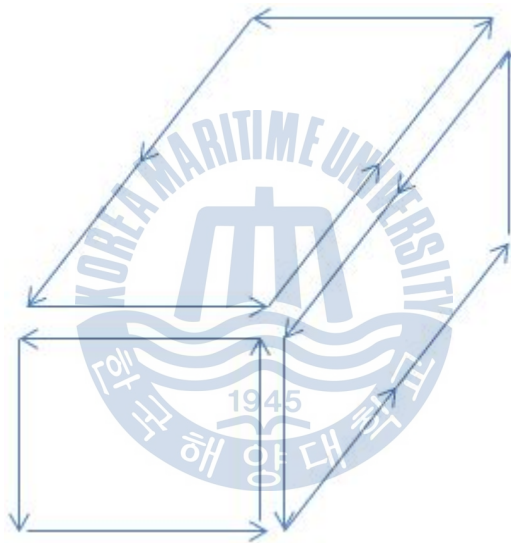


Fig. 12 Loop

(7) Coedge

Coedge는 면의 Loop 내에 존재하는 모서리를 나타낸다. 다양체(Manifold) 솔리드 Body Shell에서, 각 모서리에는 정확히 두 개의 면이 접해 있다. 따라서 두 개의 Coedge가 있다. 비다양체(Non-manifold)Body Shell의 경우, 모서리는 2개 이상의 면과 인접해있다.

(8) Edge

Edge는 곡선과 연관된 위상이다. 모서리(Edge)는 하나 이상의 정점으로 경계가 그어지고, 각 끝에 있는 정점을 참조한다. 모서리가 놓인 곡선이 부정이라면, 경계가 없는 모서리가 된다. 폐곡선인 경우는, 정점과 값이 같거나 NULL이어야 한다. 양 정점의 값이 NULL이면, 모서리는 전체 곡선이 된다. 원뿔의 끝 점과 같이 양 정점 포인터가 똑같은 경우는 형상 포인터가 NULL이 된다.

(9) Vertex

Vertex는 면이나 와이어(Wire)의 귀퉁이를 말한다. Vertex는 객체 공간상에서의 점이나, 경계가 있는 모서리를 말한다.



Fig. 13 Vertex

2.4.6. ACIS의 기능

2.4.6.1. 개요

ACIS kernel은 3차원 물체 데이터를 관리하는 위상(Topology) 모듈과 이의 연산을 수행하는 형상(Geometry) 모듈, 사용자 지원을 접속하는 API(Application Procedural Interface)모듈로 구성되어 있다. 위상 모듈은 Non-manifold를 지원 하는 3차원 물체의 표현을 가능하게 해주며, 이에 대한 오일러 연산을 수행한다. 형상 모듈은 매개 변수(Parametric) 곡선과 곡면의 표현 이의 Intersection 계산을 수행한다.

ACIS의 기능은 모델링과 관련된 기능과 모델을 관리하는 기능이다. 모델링과 관련된 기능은 모델 생성, 부울 연산(Boolean Operation), Blending, Sweep, Intersection 등의 기능을 말하며, 모델 관리 기능은 부분 저장과 복원, 메모리 관리 기능 등이 있다. 논문에서는 주로 사용한 모델링 기능에 대해서만 설명한다.

2.4.6.2. 모델링 기능

(1) Edge

- api_mk_ed_line : 시작점과 끝점 사이에 직선을 만든다.
- api_mk_bs3_curve : 3차원 NURBS 곡선에 의해 정의된 교차(Intersection) 곡선을 만든다.
- api_mk_ed_ellipse : 타원을 만든다.

*보간(interpolated) 곡선을 만드는 여러 가지 방법

- api_edge : 이미 존재 하는 모서리의 복사본

- api_mk_ed_int_ctrlpts : 제어점과 knot와 가중치(weight)에 의해 정의된 정확한 NURBS 곡선

(2) Wire

- api_make_wire : 일련의 점들을 통한 다각형 wire

(3) Face

- api_make_plface : 평면 위의 Parallelgram 으로서의 면

- api_mk_fa_spl_ctrlpts : 제어점과 knot와 가중치(weight)에 의해 정의된 NURBS spline 으로서의 면

(4) 부울 연산(Boolean Operation)

부울 연산은 솔리드나 쉬트 요소들로 구성된 BODY 들에 대한 집합 연산을 한다. 그러나 WIRE는 부울 연산을 수행하지 못한다. 부울 연산을 행한 결과는 정규화된 점들의 집합이 된다. 부울 연산으로는 두 BODY 간의 합집합(Unite), 교집합(Intersect), 차집합(Subtract)을 구한다.

2.4.7. 활용 방안

ACIS는 기존의 폐쇄형 구조(closed architecture)로 된 CAD/CAM 시스템과는 달리 객체지향 기술이라는 새로운 개념을 접목시킨 형상 모델러이다. 그러나 ACIS kernel 형태의 라이브러리로만 이루어져 있기 때문에 이것만을 가지고 형상모델링을 수행하기에는 부족하다. 특히 ACIS를 사용함에 있어 불편한 점은 형상 모델링 결과를 모델링이 끝난 즉시 가시화 할 수 없다는 것이다. 모델링 결과를 파일에 저장해 두고 다른 응용 프로그램과 husk를 이용해야만 결과를 볼 수 있다. 따라서 Kernel 형태의 라이브러리로만 이루어져 있는 ACIS의 유연성 및 효율성을 높이기 위해 상용화 된 CAD 응용 프로그램을 이용하여 모델링을 수행하고, IGES파일에 저장한다. IGES파일에서 모델링에 필요한 중요 파라미터를 읽어, MFC와 OpenGL 그래픽 라이브러리를 이용하여 가시화를 하고, 모델링 된 파일의 연산 알고리즘은 ACIS의 API함수와 프로그래밍 언어를 활용하여 구한다.



제 3 장 GUI 활용한 시스템 개발

3.1. 개요

2장에서 언급했듯이 ACIS 라이브러리를 활용한 기하연산처리함수의 활용은 다양한 기하연산처리가 가능하나 바로 가시화 할 수 없다는 불편한 점이 있다. 즉 기하연산처리함수의 유연성과 효율성을 높이기 위해 GUI 시스템을 적용하여 사용자가 쉽게 가시화 하고 활용 할 수 있는 시스템을 개발이 필요하다.

3장에서는 공개용 그래픽 라이브러리인 OpenGL을 활용한 2,3차원 형상 표현 기법에 대해 소개한다. 자세한 내용은 참고 문헌(김재준, 차경애, 2006; Mdave, 남기혁, 2005)을 참고 한다.

3.2. OpenGL 그래픽스 라이브러리

OpenGL 1992년 실리콘 그래픽스사에 만든 2차원 및 3차원 그래픽스 표준 API(Application programmer's Interface) 규격으로서 그래픽 하드웨어로의 소프트웨어 인터페이스를 정하고 있다. 대부분의 그래픽스 라이브러리가 그렇듯이 물체들을 그래픽 하드웨어의 Frame Buffer로 렌더링 하는 것을 주요 목적으로 한다. 따라서 OpenGL은 기본적인 그래픽스 기능과 동시에 고급스러운 그래픽스 기능들의 특징을 함께 갖고 있으며, 3차원 물체들의 묘사와 이들의 정확한 2차원 이미지로의 전환을 위한 충분한 함수들이 있다.

OpenGL은 약 250여 가지의 함수 호출을 사용하여 단순한 기하도형에서 복잡한 3차원 장면을 생성할 수 있다. 기본 Primitive로는 기하 물체의 정의를 위한 점(Point), 선(Line, Segment), 다각형(Polygon) 등이 있고, 2차원 이미지의 정의를 위한 Bitmap 혹은 Pixel이 있다. 2차원 혹은 3차원 물체 장면들의 묘사는 이러한 Primitive 들을 이용해서 하며 각각의 렌더링을 위한 속성도 함께 지정하게 된다. OpenGL은 묘사된 장면의 정확한 렌더링을 담당하게 되며,

이는 프로그래머의 관점에서 볼 때 그래픽 하드웨어에 관계없이 같은 결과를 내게 된다. 2차원 혹은 3차원 장면들은 이러한 Primitive 들로 묘사가 되며, 그 외의 곡선이나 곡면으로 이루어진 물체들은 OpenGL의 Primitive로 정의가 될 수 있도록 근사를 한다.

OpenGL의 수행에는 주어진 데이터를 최종 Frame Buffer의 Pixel 값으로 전환하는데 여러 가지 절차가 필요 하는데, 이를 Pipeline이라고 한다.

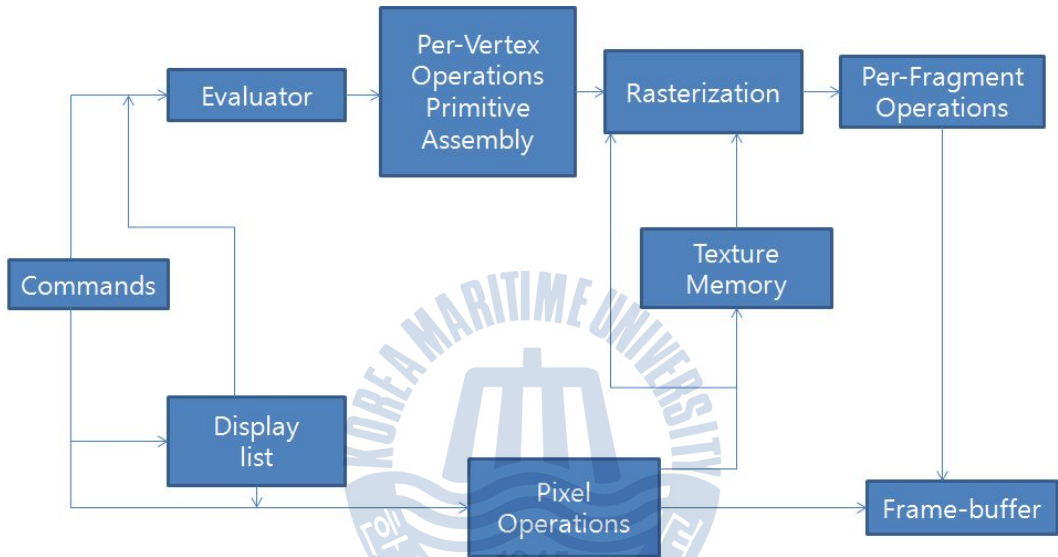


Fig. 14 Rendering process of OpenGL

3.3. OpenGL을 이용한 3차원 형상의 표현 기법

OpenGL에서는 모든 물체가 근본적으로 Vertex로 지정이 된다. 점은 그 좌표로, 선분은 그 두 끝점들의 좌표로, 그리고 면은 그 꼭짓점들의 좌표로 나타내어진다. 3차원 형상은 이 중 면들로 나타내어지는데 이는 OpenGL에서는 glBegin(GL_POLYGON)과 glEnd() 사이에 glVertex()를 수행함으로써 나타내게 된다. 나타내어지는 면의 성격과 지정하는 데이터의 포맷에 따라 GL_POLYGON은 GL_TRIANGLES, GL_QUADS, GL_TRIANGLE_STRIP,

GL_TRIANGLES_FAN, GL_QUAD_STRIP 등으로 할 수도 있다.

위의 함수와 속성을 이용하여 형상을 표현하고, 그 외 보는 위치 및 각도의 지정, 색의 지정, 면의 재질 지정 및 빛의 지정, 면의 방향성 및 Z-buffering, 기타 효과를 나타내는 함수를 이용하여 렌더링을 수행 할 수 있다.

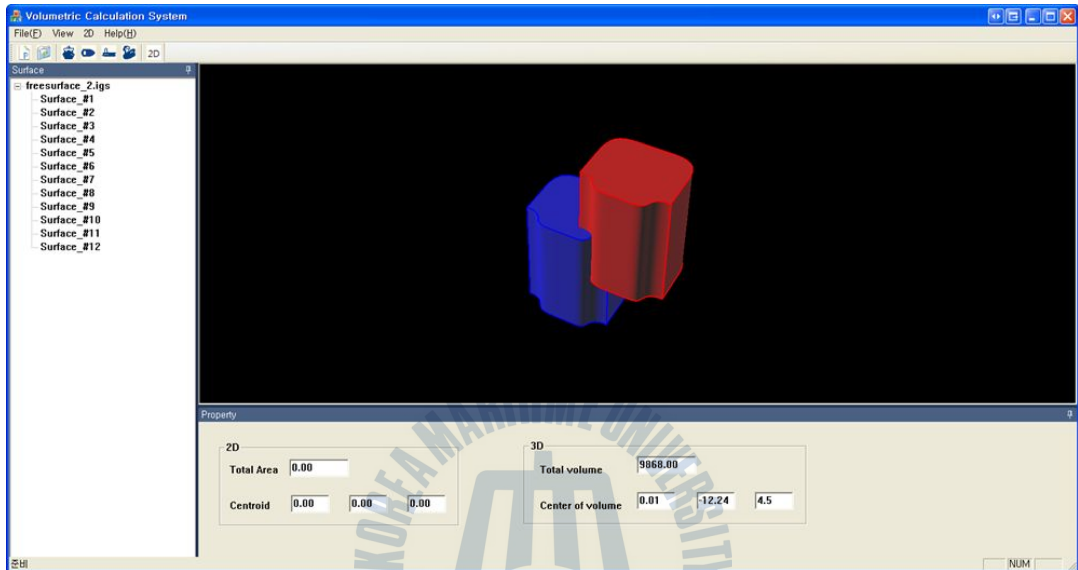


Fig. 15 GUI configuration

제 4 장 연구 내용

4.1. 개요

소형 무인 잠수정과 같은 복합 기하모델의 전체 부피와 부심의 위치를 구하는 알고리즘을 구현하기 위해서 곡면표현기술인 NURBS 곡면을 이용하여 모델링을 수행한다. 모델링된 모델을 앞서 설명된 중립 포맷인 IGES 파일로 저장한다. 저장된 IGES 파일을 분석하여 형상 정보를 저장 할 수 있는 알고리즘을 구현한다. 알고리즘을 통해 저장된 형상 정보와 모델 상호간의 위상 관계를 정리하여 ACIS의 기하연산처리함수와 프로그래밍 언어를 활용하여 해당 관계에 따라 전체 부피와 부심을 구하는 알고리즘을 구현 한다.

최종적으로 구현된 알고리즘을 사용자인터페이스함수(MFC)와 범용그래픽라이브러리(OpenGL)를 활용하여 사용자가 쉽게 가시화 할 수 있는 GUI 프로그램을 구축한다.

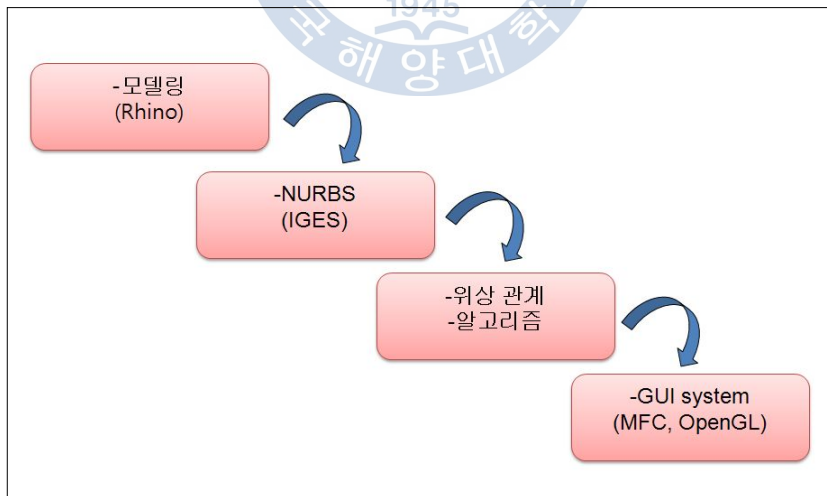


Fig. 16 Procedure of proposed work

4.2. 모델링(NURBS)

소형 무인 잠수정의 모델을 분석 한 후 상용 CAD 프로그램인 Rhino를 이용하여 모델링을 수행한다. 모델링은 수학적 연산이 가능한 기하정보를 담고 있는 NURBS 곡면을 이용하여 모델링을 수행한다. NURBS 곡면은 차수(Degree)가 너무 높거나 제어점(Control Points)의 개수가 많아질 경우 ACIS의 기하연산처리함수에서 값의 오류가 생길 가능성이 있으므로 차수와 제어점의 개수를 조정한다(Fig. 19). 아래의 Fig. 18과 같이 모델링을 수행한 후 IGES 파일로 저장 한다.

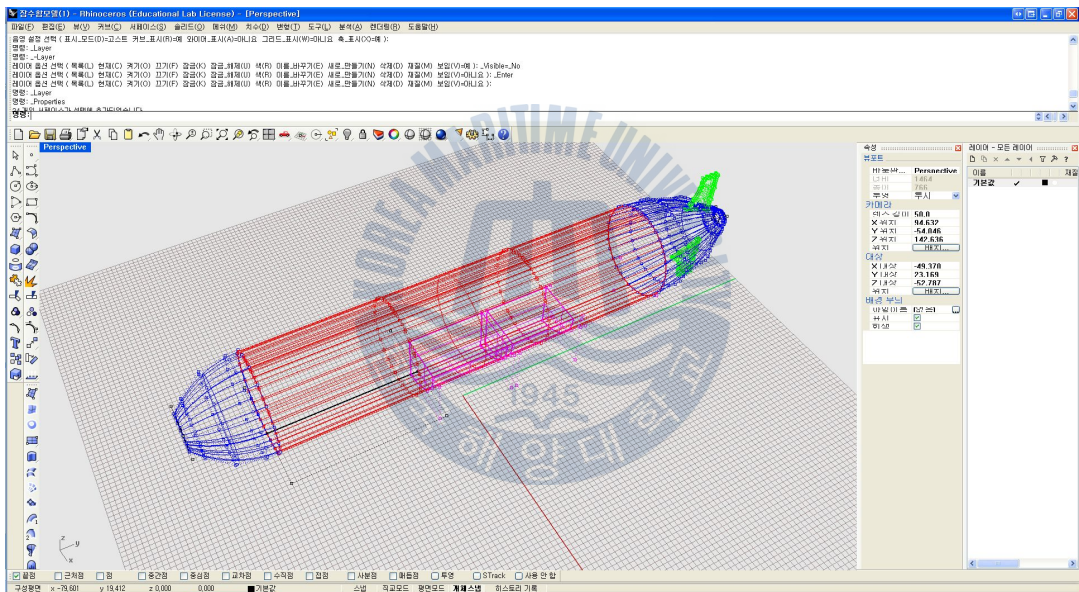


Fig. 17 CAD model of AUV

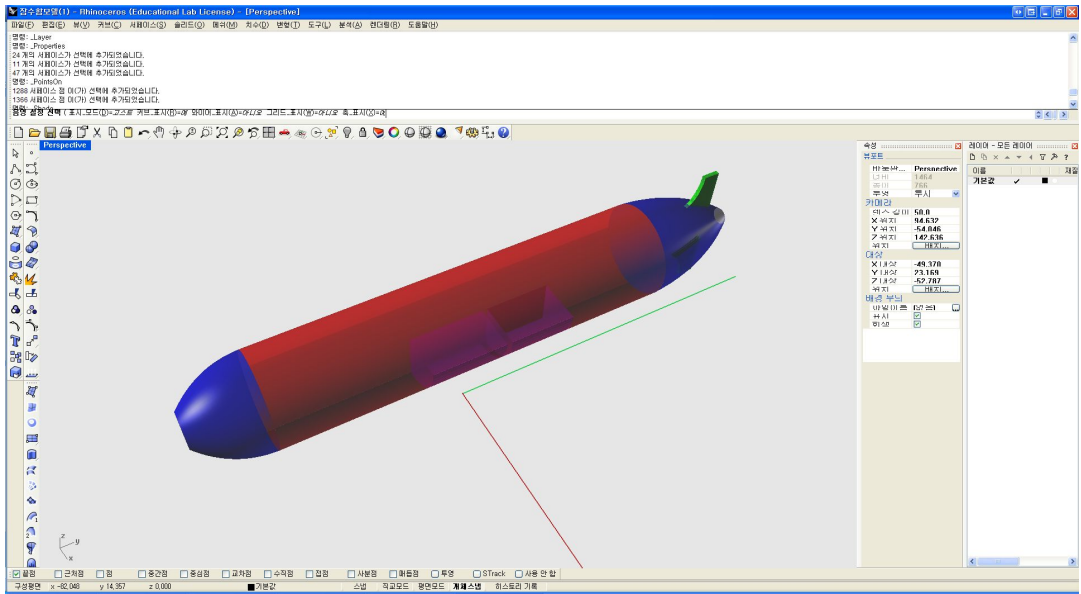


Fig. 18 Rendered CAD model of AUV

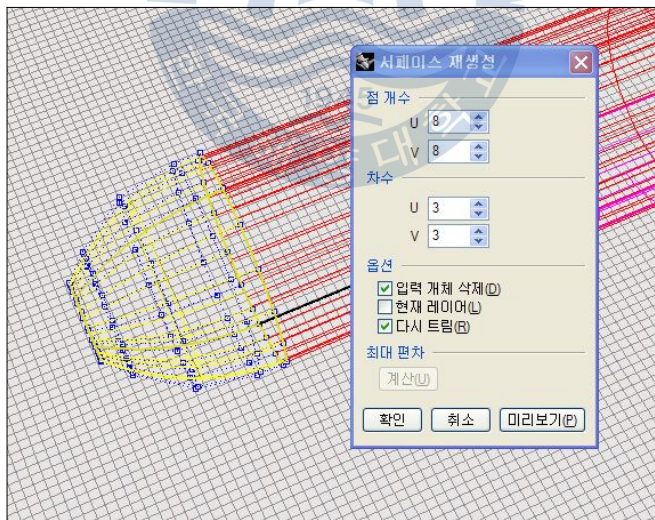


Fig. 19 Recreation of AUV surface

4.3. IGES 파일 포맷 분석

NURBS 곡면을 활용하기 위해서는 변환된 IGES 파일 포맷의 구조를 분석하여 필요한 파라미터 값을 저장 하는 알고리즘을 구현 하여야 한다. 주요 기술에서 설명한바와 같이 NURBS 곡면에 필요한 주요 파라미터 요소는 두 방향의 차수(Degree), Knot, Weight, 제어점(Control points)의 좌표(x, y, z), 제어점의 개수이다.

$$G(s,t) = \frac{\sum_{i=0}^{K1} \sum_{j=0}^{K2} N_{M1+1,i}(u) N_{M2+1,j}(v) W(i,j) P(i,j)}{\sum_{i=0}^{K1} \sum_{j=0}^{K2} N_{M1+1,i}(u) N_{M2+1,j}(v) W(i,j)} \quad M=\text{Degree of basis function}$$

Fig. 20 Formula of NURBS

이들 정보는 IGES 파일에서 parameter data section에 저장되어 있으며 아래 Fig. 21 과 table. 2를 통해 확인 할 수 있다.

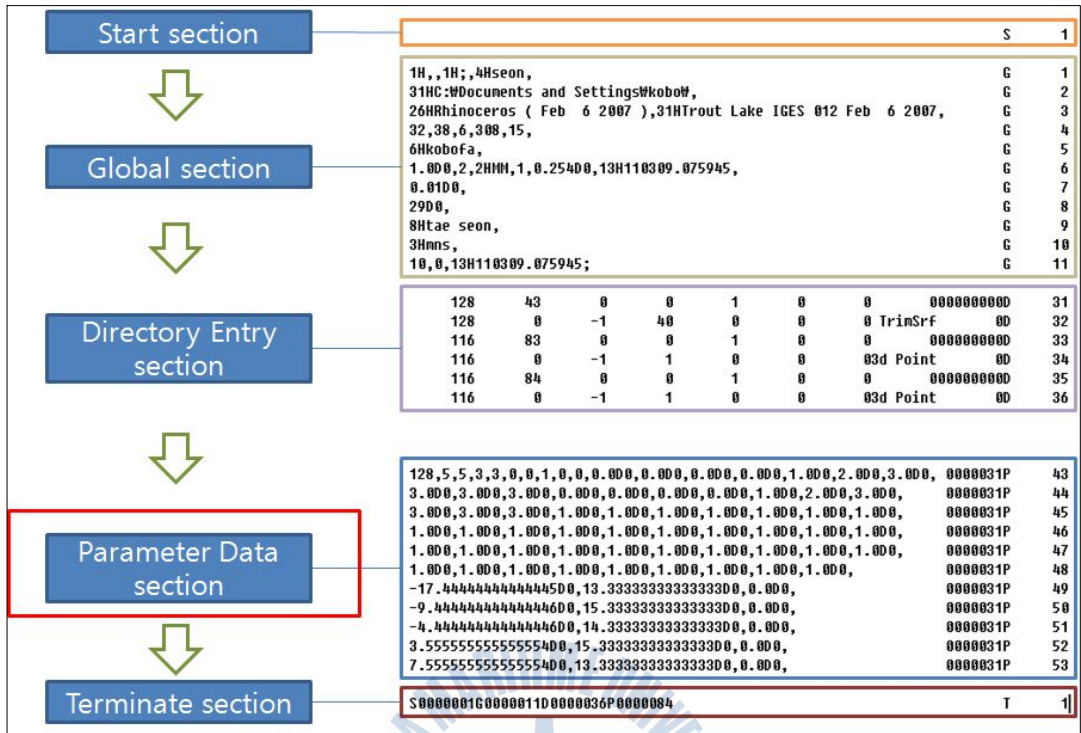


Fig. 21 Data format of IGES

Table. 6 Parameter data of IGES surface

Parameter 데이터	값	특징
곡면 form number	128번	정수형
제어점 개수(u방향)	6(0~5)개	정수형
제어점 개수(v방향)	6(0~5)개	정수형
차수(u 방향)	3차	정수형
차수(v 방향)	3차	정수형
Knot vector(u 방향)	0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 3.0, 3.0, 3.0	실수형
Knot vector(v 방향)	0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 3.0, 3.0, 3.0	실수형
weight	1.0, 1.0, 1.0, 1.0 ~ 1.0, 1.0, 1.0	실수형
제어점 좌표(x, y, z)	-17.444, 13.333, 0.000 ~ ~	실수형

4.4. 위상 관계

소형 무인 잠수정의 경우 내부 부품간의 위치의 변화 또는 간섭의 유무에 따라 전체 부피와 부심의 위치에 영향을 받기 때문에 알고리즘을 구현함에 앞서 모델 사이에 생길 수 있는 위상 관계를 정리 할 필요가 있다. 모델의 위상 관계의 정리는 3차원 앞서 2차원에서 정리를 하였고, 3차원으로 확장을 하였다. 또 한 IGES 파일에서 저장한 파라미터 값들을 사용하는 ACIS의 기하연산처리함수에 대한 평가를 하기 위한 목적도 있다.

2차원의 경우 3가지 경우의 위상 관계를 고려 할 수 있다. 두 모델 간 서로 교차하는 부분이 없는 경우, 모서리를 공유하는 경우, 서로 같은 면을 공유하는 경우 이다.

Table. 7 Three cases of 2D merge

No	상 태	위상 관계
1	교차 없음	 <p>Fig. 22 Case 1 of 2D</p>
2	모서리 공유	 <p>Fig. 23 Case 2 of 2D</p>
3	면 공유	 <p>Fig. 24 Case 3 of 2D</p>

3차원의 경우 교차의 유무에 따라 위상관계가 나뉘지는 것은 2차원과 비슷하나 부피를 공유하는 관계가 추가 된다.

Table. 8 Four cases of 3D merge

No.	상 태	위상 관계
1	교차 없음	 <p>Fig. 25 Case 1 of 3D</p>
2	모서리 공유	 <p>Fig. 26 Case 2 of 3D</p>
3	면 공유	 <p>Fig. 27 Case 3 of 3D</p>
4	부피 공유	 <p>Fig. 28 Case 4 of 3D</p>

4.5. 알고리즘

IGES 파일에서 곡면에 필요한 파라미터 값을 저장 하는 알고리즘 통해 저장 된 변수는 ACIS 라이브러리에서 사용 할 수 있도록 API 함수를 통해 각 FACE 객체로 변환 한다. 정리된 위상 관계를 바탕으로 알고리즘을 구현함에 있어서, 모델간의 교차 정보는 ACIS의 기하연산처리함수인 `api_fafa_int` 함수를 이용하여 해당 관계에 따라 반환 값의 차이를 주어 알고리즘을 수행 하였다.

2차원 면적에서 교차하지 않을 경우는 각 곡면의 면적과 도심을 구해 수학적 연산을 통해 전체 면적과 도심을 구하였고, 교차 하였을 경우는 불린 연산 (Boolean)연산 중 합집합을 통해 두 곡면을 하나의 곡면으로 처리하여 면적과 도심을 구하였다. 2차원 연산 알고리즘 순서도는 아래 Fig. 29 와 같다.



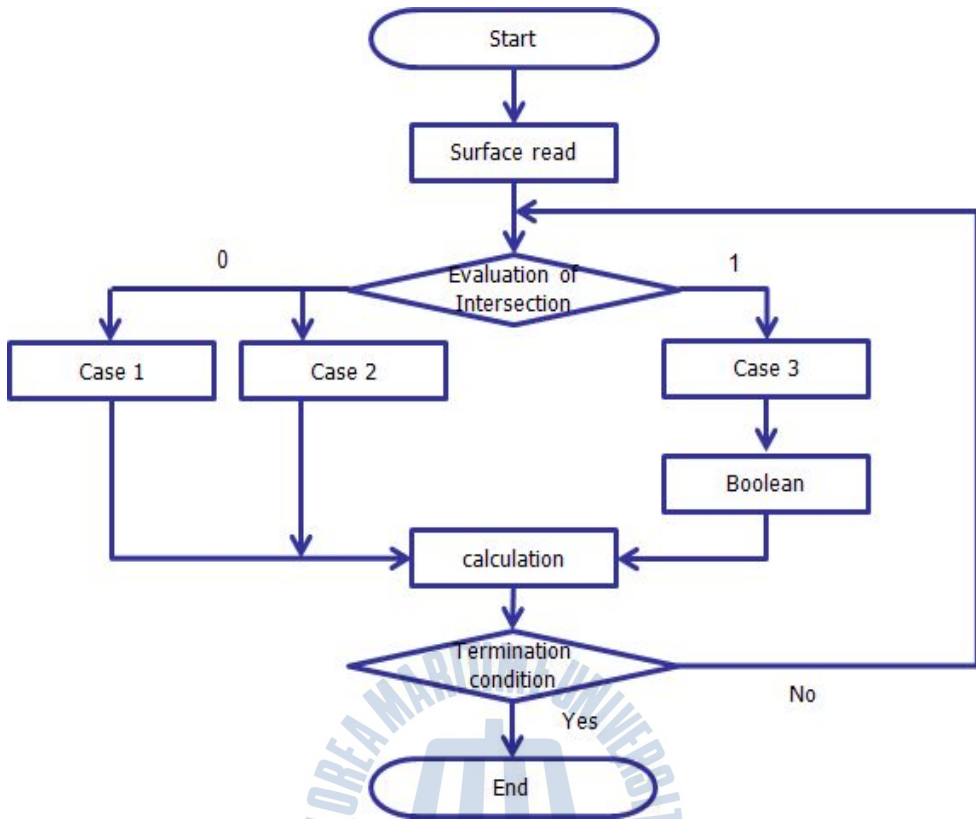


Fig. 29 Flow chart of 2D algorithm

3차원에서는 2차원과 마찬가지로 교차함수를 이용하여 모델의 위상 관계를 파악하였고, 2차원에서의 차이는 부피를 공유하고 있는 관계이다. 2차원에서의 유사하게 교차 정보가 없는 경우는 부피와 부심을 구하는 기하연산처리함수를 통해 각각 구하고 수학적 연산을 통해 전체 면적과 두 모델간의 전체 부심을 구하였다. 면끼리 닿아 있거나 부피를 공유 하고 있는 경우는 불린 연산인 합 집합을 통해 하나의 모델로 간주하고 전체 부피와 부심을 구하는 알고리즘을 구현 하였다. 3차원 연산 알고리즘의 순서도는 아래 Fig. 30과 같다.

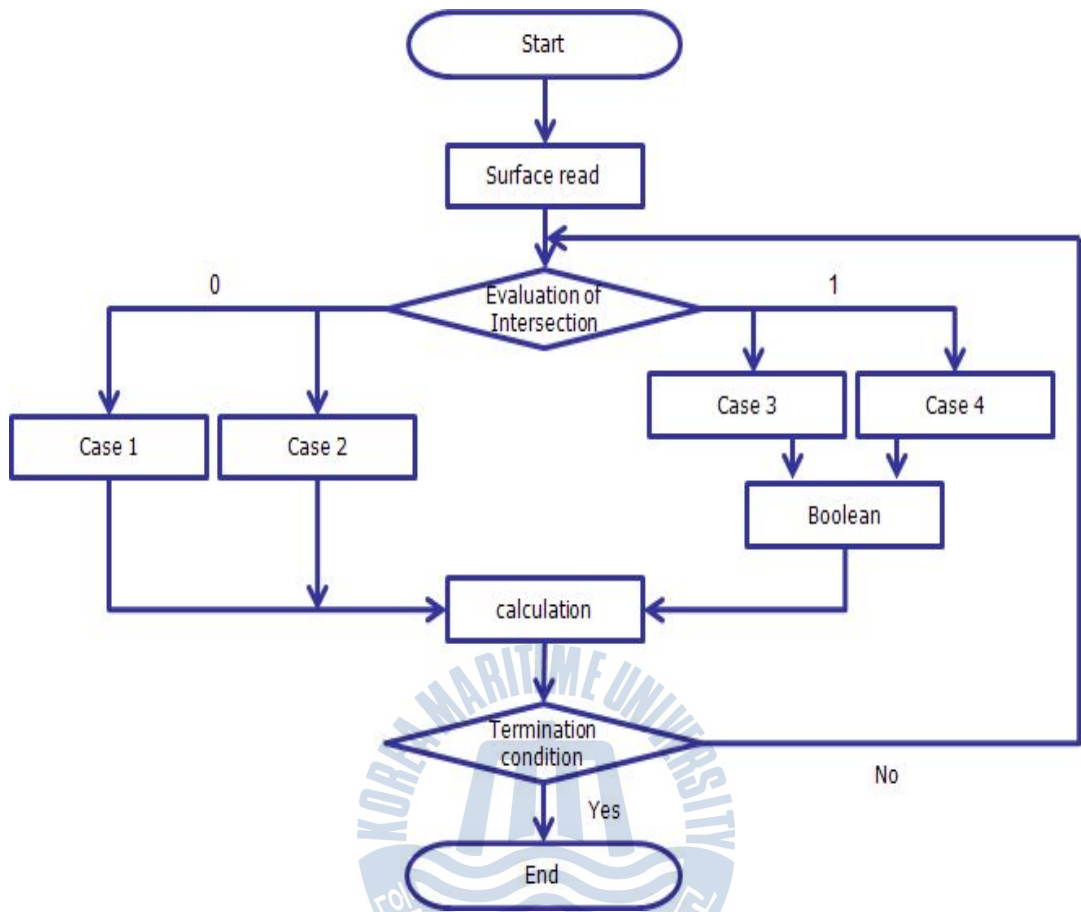


Fig. 30 Flow chart of 3D algorithm

4.6 구현

2차원과 3차원에서 각각의 위상 관계에 따라 구현된 알고리즘을 3차원 형상 표현 기법인 OpenGL과 MFC를 이용하여 사용자가 실시간으로 쉽게 확인 할 수 있도록 GUI 프로그램을 개발 하였다. 위상 관계와 알고리즘 구현을 위해 사용 하였던 기본 형상 모델의 결과와 해당 알고리즘을 적용한 소형 무인 잠수정의 내부 부품 위치에 따른 전체 부피와 부심의 위치를 구현 하였다.

- 간섭이 없는 두 평면의 전체 면적과 도심

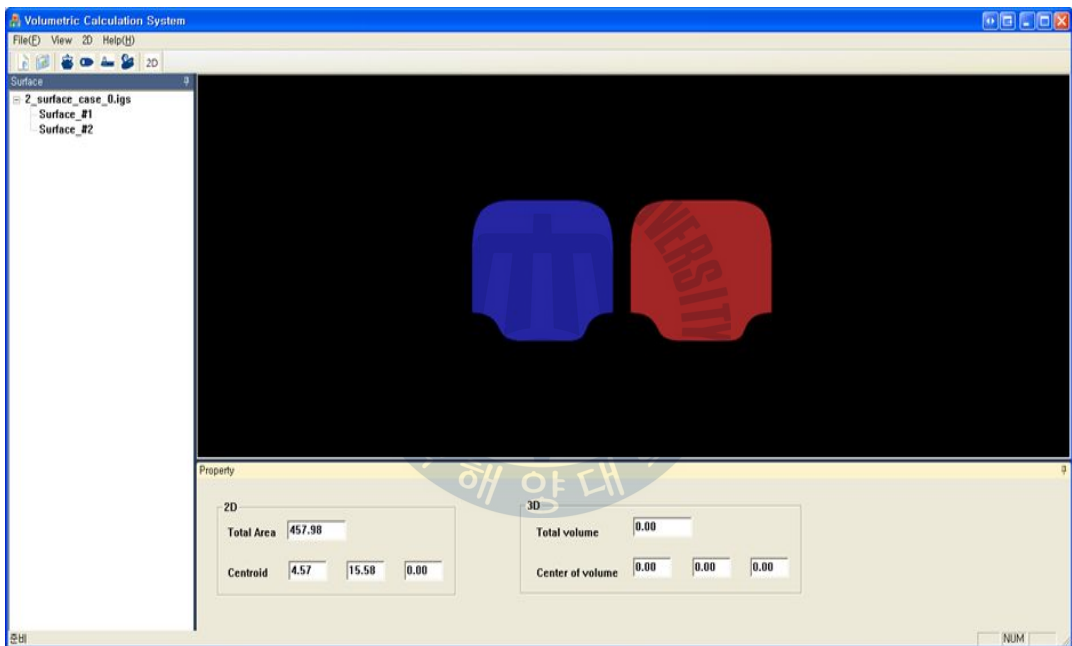


Fig. 31 Result case 1 of 2D

- 모서리를 공유하는 두 평면의 전체 면적과 도심의 변화

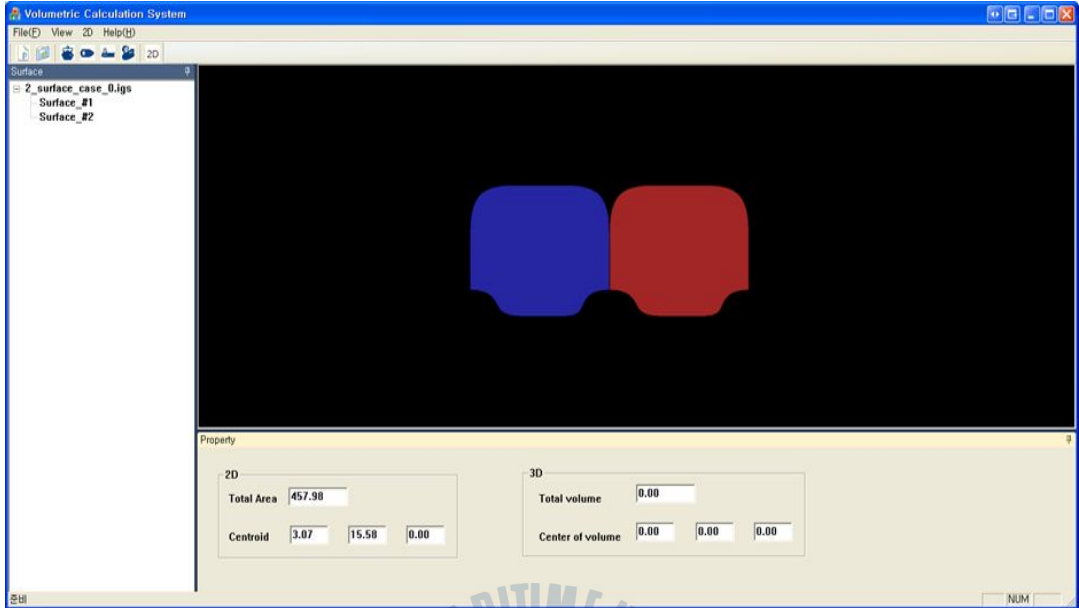


Fig. 32 Result case 2 of 2D

- 면을 공유하고 있는 두 평면의 전체 면적과 도심의 변화

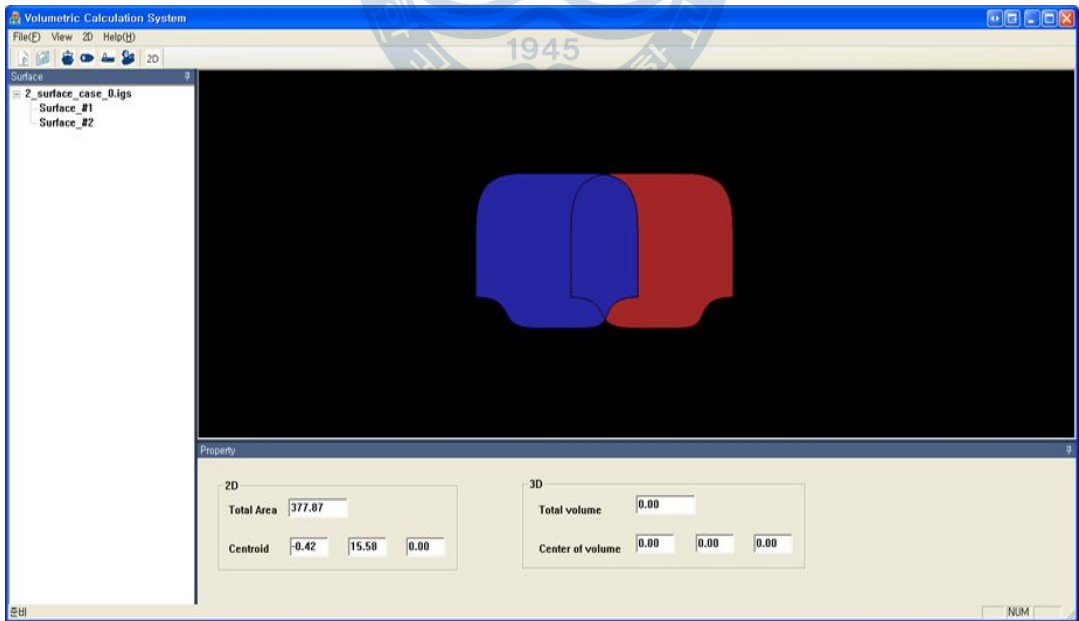


Fig. 33 Result case 3 of 2D

- 교차가 없는 두 모델의 전체 부피와 부심

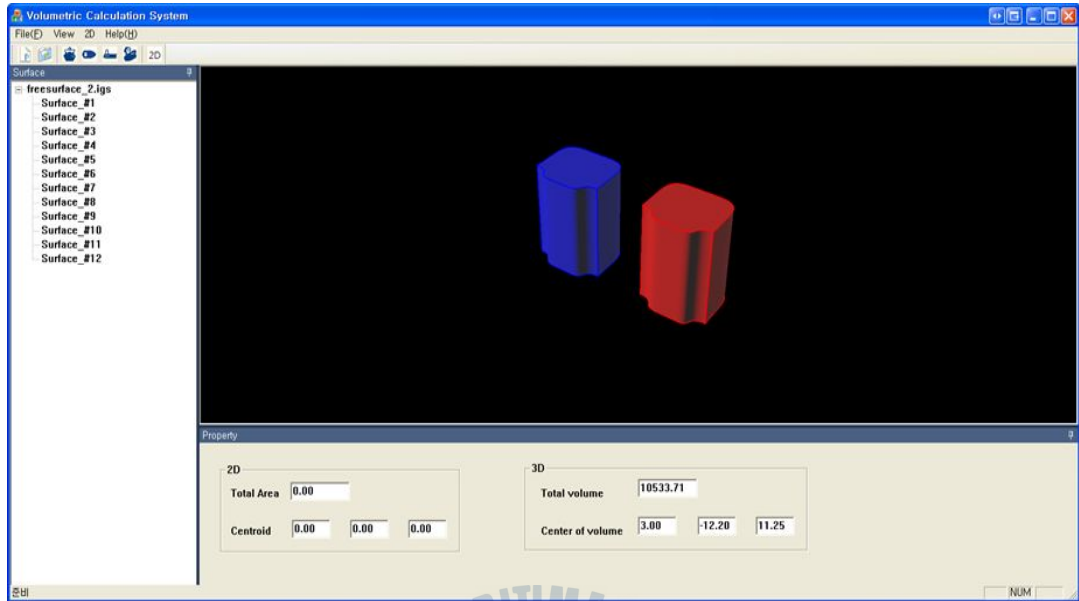


Fig. 34 Result case 1 of 3D

- 모서리를 공유 하고 있는 두 모델의 전체 부피와 부심의 변화

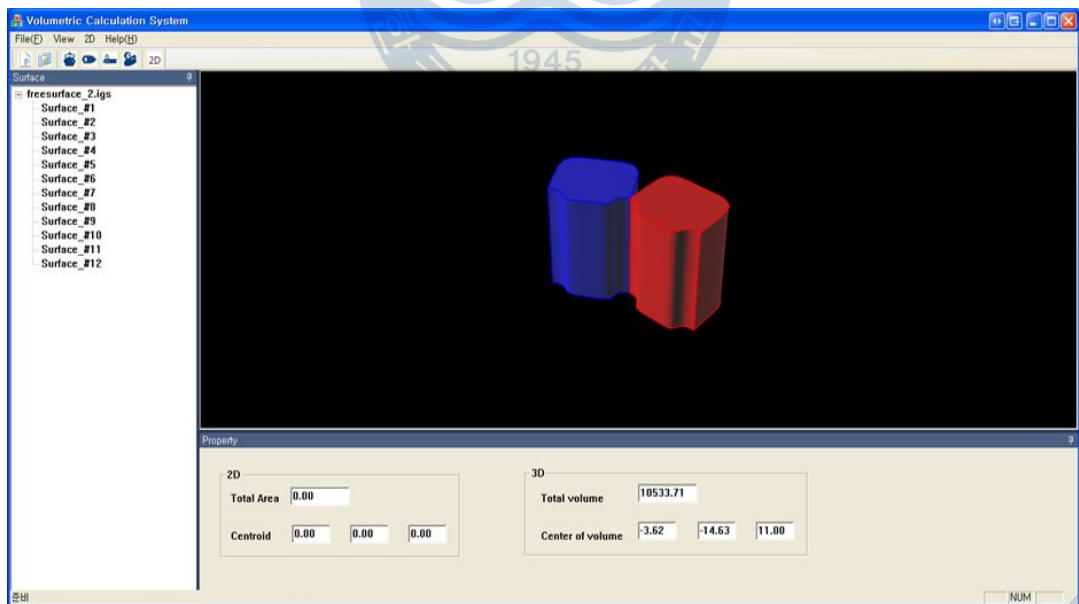


Fig. 35 Result case 2 of 3D

- 면을 공유하고 있는 두 모델의 전체 부피와 부심의 변화

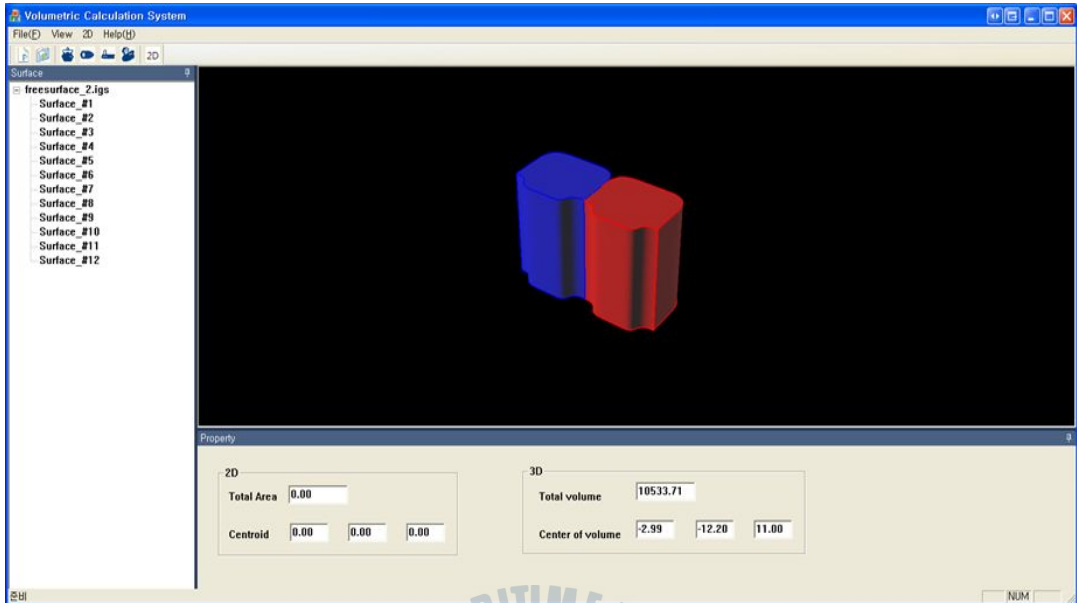


Fig. 36 Result case 3 of 3D

- 부피를 공유 하고 있는 간섭된 두 모델의 전체 부피와 부심의 변화

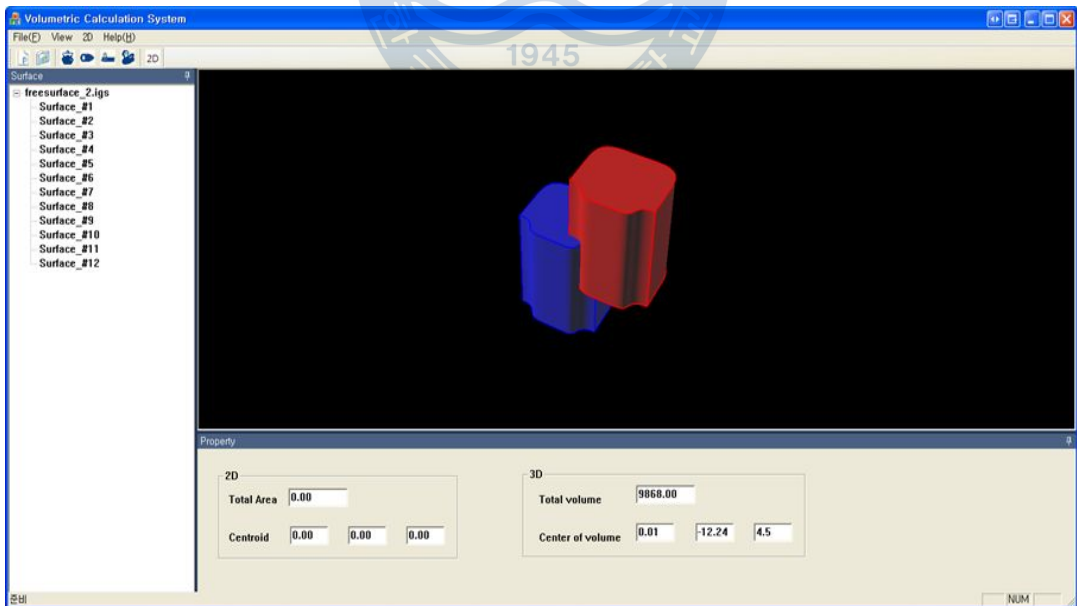


Fig. 37 Result case 4 of 3D

-NURBS 곡면으로 모델링 된 AUV의 전체 부피와 부심

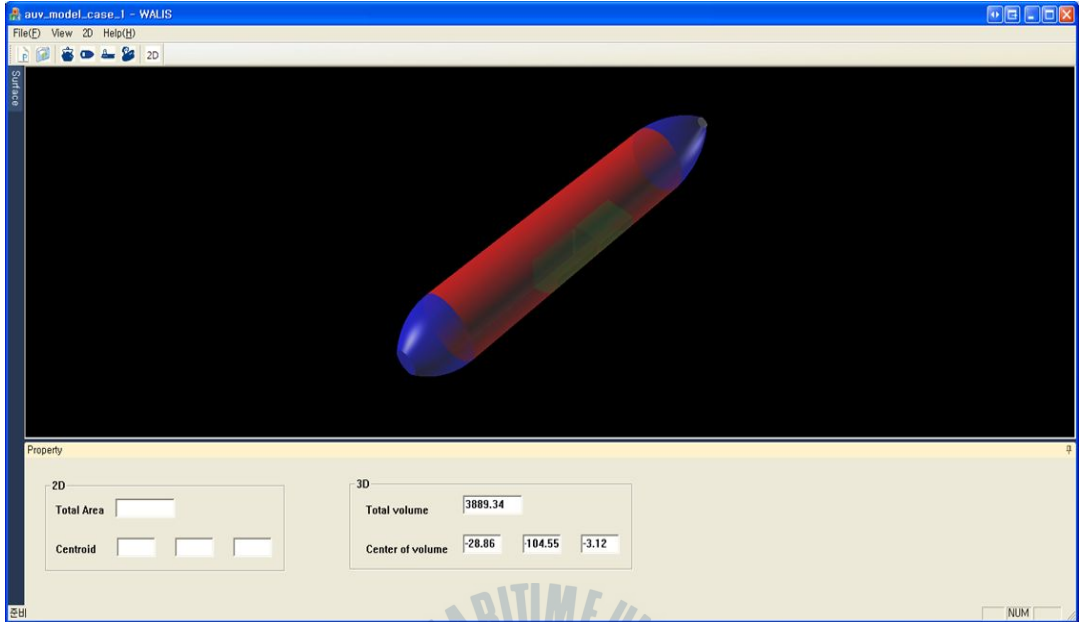


Fig. 38 Result AUV 1 of 3D

-내부 부품을 이동한 후 계산된 전체 부피와 부심의 변화

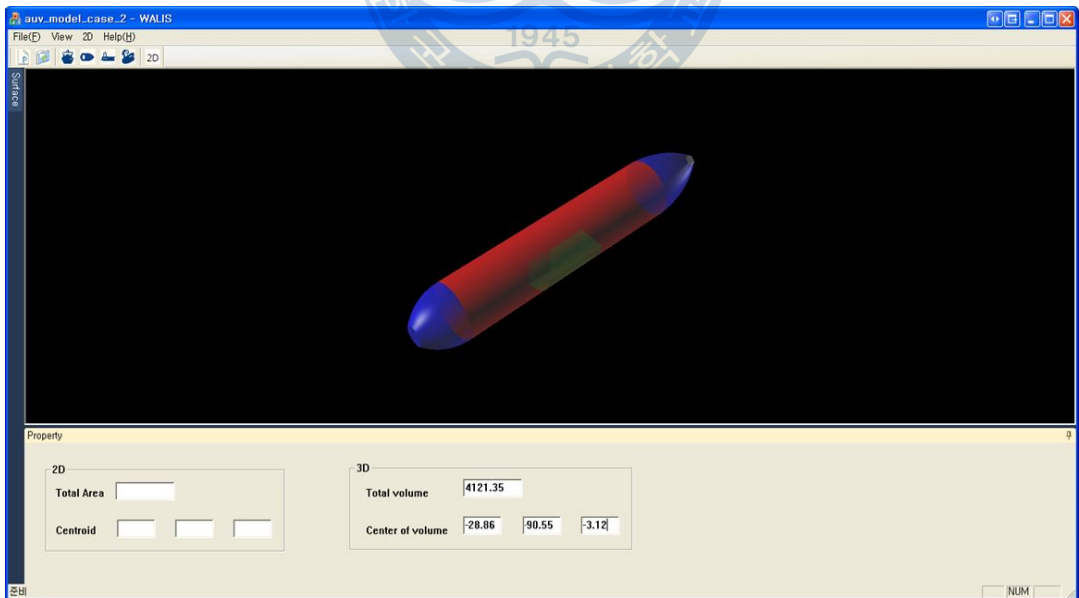


Fig.39 Result AUV 2 of 3D

제 5 장 결 론

5.1. 연구 결과

소형 무인 잠수정의 모델을 분석하여 NURBS 곡면으로 모델링을 수행, 중립 포맷인 IGES 파일로 저장 하였다. IGES 파일의 데이터 구조를 파악하여 ACIS 기하연산처리함수에 활용 가능한 모델의 형상정보를 저장 할 수 있도록 알고리즘을 구현하였다. 모델 간의 예측 할 수 있는 상호 위상 관계를 정리 하여 2차원, 3차원 복합 기하 모델의 면적, 도심, 부피, 부심을 구하는 알고리즘을 구현 하였고, 이를 사용자가 쉽게 가시화 할 수 있도록 그래픽 라이브러리(OpenGL)와 MFC를 이용하여 GUI 프로그램을 개발 하였다.

5.2. 기여도

안정성이 필요한 소형 무인 잠수정의 DP(Dynamic Position)과 같은 역학적 특성을 계산하기 위해 즉각적인 부피와 부심의 계산이 가능 하다. 일부 형상과 위치의 수정 시 재계산을 효율적으로 처리 할 수 있다. 또 한 모델의 위상 관계를 교차(Intersection)의 유무에 따라 정의 하였기에 모델 간 간섭을 판단 할 수 있는 정보를 제공 한다.

5.3. 향후 과제

현재는 솔리드 모델을 NURBS 곡면으로 분리하여 적용 하였으나 추후, NURBS 곡면뿐만 아니라 솔리드 모델링과 같은 다양한 형상모델링 기법을 적용 할 수 있는 알고리즘을 구현 할 필요가 있다. 3차원의 경우 모델 간 위상 관계를 심화 연구하여 추가 하면 다양한 모델을 수용하여 신뢰도 있는 결과를 예상 할 수 있다. 또한 3차원 렌더링을 하기 위해 OpenGL 그래픽 라이브러리

를 이용하는 것은 효율적이지 못했다. 이를 ACIS의 기하연산처리함수에 적합한 3D Application Framework 을 적용하면 알고리즘을 단순화 시킬 수 있고 효율적인 가시화 프로그램으로 확장 할 수 있을 것이다.



참 고 문 헌

- Jonathan Corney. <<3D Modeling with ACIS>>, Saxe-Coburg(2001)
- 이현찬, 채수원, 최영. <<컴퓨터 그래픽스 및 형상 모델링>>, 시그마프레스 (1996)
- Dave shreiner, Mason Woo, Jackie Neider, Tom davis. <<OpenGL 프로 그래밍 가이드>>, 정보문화사(2005)
- 김재준, 차경애. <<OpenGL을 이용한 컴퓨터 그래픽스 실습>>, 흥릉과학출판사(2006)
- Piegl L, Tiller W. <<The NURBS Book>>, Springer-Verlag(1997)
- Rogers D.F. <<An Introduction to NURBS: With Historical Perspective>>, Morgan Kaufmann Publishers(2001)
- US PRO. <<IGSE 5.3>>, U.S. Product Data Association (1996)
- 박동삼, 최종순, 최영희. [IGES FORMAT을 이용한 구멍가공용 CAM 시스템 개발], 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A pp. 1051-1056(1998)
- 이재석. [고기능 설계 자동화 시스템 개발에 관한 연구II], 시스템공학연구소(1996)
- Nehe's OpenGL Tutorials, <http://nehe.gamedev.net/>,(2006)

- SPATIAL forum, <http://forums.spatial.com/t5/3D-Modeling/bd-p/ACIS>, (1999)
- 윤희중, 최종순, 박동삼. [IGSE를 이용한 브러쉬 디버링의 자동화], 한국정밀공학회지 제 17권 제 4호 (2000)
- 주우석. <<C,C++로 배우는 자료 구조론>>, 한빛 미디어(2005)

