

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학ME97-E-28)에 의하여 연구되었음.

STL의 오류수정 및 형상수정 시스템의 개발

채희창*

System Development for STL Error Correction and Shape Modification

Hee-Chang Chae*

ABSTRACT

STL has several errors such as orientation error, hole error, and acute triangle error on being translated from CAD software. These errors should be corrected before using in Rapid Prototyping. So the software is necessary to correct errors. In this study, STL Editor which is a system for STL error correction and shape modification is developed and contains following characteristics. 1.Apply the triangle based data structure. 2.Use the graphic user interface for easy work. 3.Use the Diet method to reduce data size. 4.Use the Delaunay triangulation method to enhance the quality of STL. 5.Modify the STL errors manually.

Key Words : STL, Rapid Prototyping(고속시작), STL error(STL 오류), STL Editor, Graphic User Interface, Triangle based data structure(삼각형 기반 데이터 구조), Delaunay triangulation(Delaunay삼각형 분할)

1. 서론

고속시작법(Rapid Prototyping)의 하나인 SLA (StereoLithography Apparatus)장치는 STL 포맷을 입력수단으로 사용한다. STL 포맷은 현재 RP의 데이터 입력형식으로 3차원으로 모델링 된 CAD 데이터를 일련의 삼각형 단위의 facet으로 근사화 시킨 것이다^[1]. STL 포맷으로의 데이터 변환 과정 중 많은 오류를 포함하고 있지만 이렇다할 후속 포맷이 나오지 않아 계속 쓰이고 있으며, AutoCAD, Pro/Engineer, CATIA, I-DEAS등과 같은 각종 상용 CAD소프트웨어들이 STL 포맷출력을

위한 변환기(translator)를 지원하고 있는 실정이다.

STL 포맷으로 변환된 데이터는 삼각형을 표현하기 위한 세 꼭지점과 법선 벡터를 가지고 있다. 그러나, 변환도중 꼭지점의 중복, 면의 누락이나 중복, 예각 삼각형을 포함하는 등의 많은 오류를 가지게 된다. 이에 따라 오류를 검증하고 가시화하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 국외에서는 F. Tanaka^[2] 등이 STL파일에서 두 가지 오류 즉, 삼각형 패치 사이에 facet데이터가 빠져있는 경우와 하나의 모서리에 2개 이상의 facet이 중복되어 있는 경우에 대해 점군 데이터를 2차원 평면에 투영하고, 이를 Delaunay 삼각형 분할을 기초로 한 삼각패

* 전북대학교 기계공학부

치 재구성법을 제안하였다. M. M. Wozny^[3] 등은 기존의 STL 포맷의 문제점을 지적하고 정점, 모서리, 면의 색인 리스트를 가진 RPI(Rensselaser polytechnic Institute)를 제안하였다. 그러나, 대부분의 RP장치들이 STL포맷을 표준으로 지원하고 있어 호환성에 문제가 있고 RPI자체도 STL 포맷을 입력 데이터로 사용하고 있기 때문에 오류가 없는 완벽한 STL파일을 대상으로 하였다. A. Dolenc^[4] 등은 RP 시스템을 위한 INSTANTCAM이란 소프트웨어를 개발하면서 기존의 CAD데이터에서 STL포맷으로의 변환의 결과가 만족스럽지 못하기 때문에 IGES파일을 와이어프레임 모델의 VDAFS포맷으로 변환하고, 이를 면 표현 방식의 STL포맷으로의 변환절차를 제안하였다. Bloor^[5] 등은 STL 포맷이 법선벡터, 꼭지점의 좌표 등과 같이 불필요하게 중복된 자료가 있어서 그 크기가 크고 위상에 대한 정보가 없기 때문에 솔리드 여부를 알 수가 없는 단점이 있다고 지적하고, 모델의 위상 정보뿐만 아니라, 제품의 전체 수명 주기에 따르는 정보를 담고 있는 STEP(STandard for Exchange of Product data) Application Protocol AP204의 면표현 방식의 B-Rep 레벨에 의한 STL 대체를 제안하였다.

현재 STL포맷 변환 및 오류 검증용으로 상용화된 소프트웨어는 다음과 같다. Brockware는 IGES를 STL 포맷으로 변환시키는 변환기로서 서피스 모델 변환에 효과적이며, 삼각형의 누락이나 facet 사이의 틈과 같은 오류를 수정할 수 있는 특징이 있다. Imageware의 RP module(RPM)은 RP조형 데이터를 생성, 편집, 수정할 수 있는 툴을 제공하고 있다^[6]. 또한 DeskArtes의 Rapid Tools는 IGES 또는 VDAFS모델의 위상을 검사하여 이들의 설계 오류를 자동적으로 또는 대화식으로 고친다^[7]. 그러나 위와 같은 상용 소프트웨어들은 개발비 및 상업적인 이유로 인해 고가로 판매되고 있는 실정이다.

앞서 설명한 바와 같이 RP에 의한 성형은 3차원 CAD모델을 STL 포맷으로 변환하고, RP시스템에 입력하여 적층에 의해 조형물을 얻게 된다. 따라서, 오류를 포함한 STL 포맷을 사용할 경우 조형물의 형상에 영향을 줄뿐만 아니라, 처음부터 성형이 되지 않기도 한다. 삼각형 방향의 불일치, 삼각형의 누락, 중복 등과 같은 오류들은 성능이 좋지 못한 변환기에 의해 발생하며 이러한 오류들은 RP에 입력하기 전에 확인하고 수정해야만 한

다.

지금까지의 연구들이나 소프트웨어들은 STL파일을 이용하여 자동적인 검증이나 수정을 할 수 있었다. 그러나 STL 포맷을 자동으로 수정할 경우 원하지 않는 결과가 발생할 수 있으므로 수동으로 처리하는 것이 바람직하다. 따라서 본 논문에서는 STL 포맷을 자동적으로 검증하고 오류가 나타나는 부분을 화면상에 도시하기 위해 GUI를 적용하고 기존의 오류수정 소프트웨어에서 자동으로 수정이 불가능한 것을 위주로 하여 수동 편집이 가능한 소프트웨어를 개발하려 한다.

2. 삼각형 기반 형상 모델링

2.1 삼각형 기반 비다양체 모델링의 데이터 구조

RP를 이용해 원하는 형상을 만들려 할 때, RP에 입력되는 입력데이터는 주로 STL파일로서, 삼각형 패치(triangular patch)이기 때문에 삼각형을 모델링의 기본 요소로 채택한다. 또한 RP에서 성형하려고 하는 입체가 다양체이지만, 다양체에 곡면으로 모델링될 수 있는 지지대가 부가되면 솔리드 및 곡면이 혼재하는 상황이 된다. 따라서 비다양체 모델이 바람직하다.

본 연구에서는 STL파일의 검증, 집합연산, 지지대의 부가 등의 작업에 적합한 삼각형 기반의 비다양체 모델링의 데이터 구조를 사용하였다.

Fig.1은 본 연구에서 제안하는 삼각형 기반 비다양체 모델러의 데이터구조를 나타낸 것이다. 이전의 연구^[8]로부터 STL 포맷에서 shell, face를 삭제하였고, face가 가지고 있던 평면 방정식은 triangle부분에서 저장하도록 하였다. 전체적인 데이터 구조는 삼각형 기반이지만, vertex를 중심으로 구성되어 있다.

triangle에는 3개의 꼭지점과 3개의 모서리, 그리고 평면 방정식을 저장한다. edge에는 2개의 vertex와 이에 인접하는 triangle에 half_edge리스트를 가리키는 포인터, 그리고 body를 가리키는 포인터를 저장한다. half_edge에는 해당 반모서리가 속한 triangle을 가리키는 포인터를 저장한다. triangle과 edge가 각각 vertex를 가지고 있으므로 vertex는 분리하여 저장하였다. 먼저, [128,128,128]의 3차원 배열 cell을 만들고 해당 cell에 vertex를

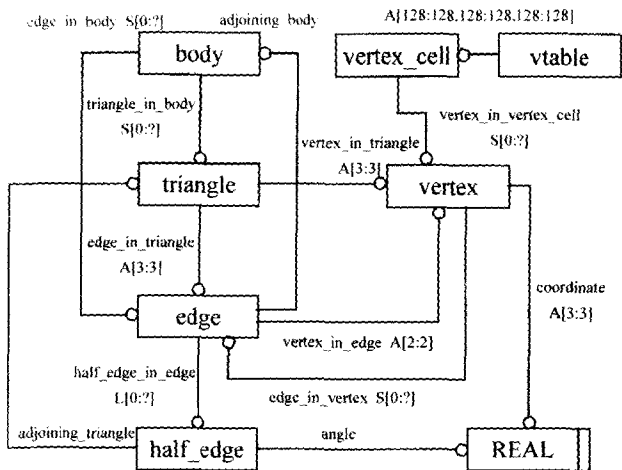


Fig. 1 Data structure of proposed triangle based modeling

저장하고 이 cell들로 vertex table을 구성하여 저장하였다.

2.2 STL의 입력 및 데이터 구조에의 저장

법선 벡터와 새 꼭지점의 좌표를 읽은 후, 다음의 과정을 거쳐 데이터 구조에 저장한다.

(1) 꼭지점 자료의 저장

삼각형의 새 꼭지점 좌표를 각각 꼭지점의 링크리스트에 저장하되, 허용공차(tolerance)를 적용해 공차이내의 꼭지점과 해당 삼각형을 데이터 구조에 추가하지 않고, 기존의 꼭지점으로 대체한다.

전체 vertex를 포함하는 box를 만들고, $128 \times 128 \times 128$ 개의 cell로 나눈 후, 각 cell에 vertex를 저장한다. 이 때, 새로 추가하는 vertex는 그것이 속한 cell과 인접한 cell에 속한 vertex와의 거리를 계산해 공차를 적용한다. 따라서, 전체 vertex와 각각 계산해 저장하는 경우에 걸리는 시간은 $O(n^2)$ 인데 반해 검색하게 될 포인트의 수가 불과 몇 개의 cell에 속한 vertex들이기 때문에 입력 시 걸리는 시간은 $O(n)$ 으로 입력 시간을 크게 줄일 수 있게 된다(Fig.2).

(2) 모서리의 저장

모서리를 저장할 때 동일 모서리의 존재를 확인 해 중복된 모서리가 없도록 한다. 이 때, 각 모서리에 대해 중복을 검사하는 경우 $O(n^2)$ 시간이 걸리므로 해당 꼭지점을 찾은 후 그 꼭지점에서

장되어 있는 모서리를 검색하여 저장한다.

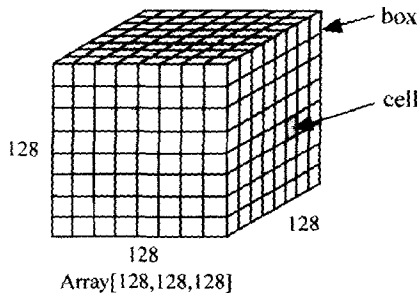


Fig. 2 Shape of vertex_cell array

(3) 삼각형의 저장

삼각형의 저장시 중복을 검사하되, 삼각형의 해당 꼭지점을 찾은 후, 모서리, 반 모서리를 거쳐 삼각형의 중복을 검사한다.

2.3 모서리의 분류와 수정

Fig.3과 같이 모서리를 분류한다. 여기서 real, aux는 정상적인 모서리이며, orientation, non-manifold, overlap, hole은 비정상적 오류가 있는 모서리이다. STL 포맷이 가지고 있는 오류 정보는 모두 모서리에 저장하였다. 본 연구의 STL

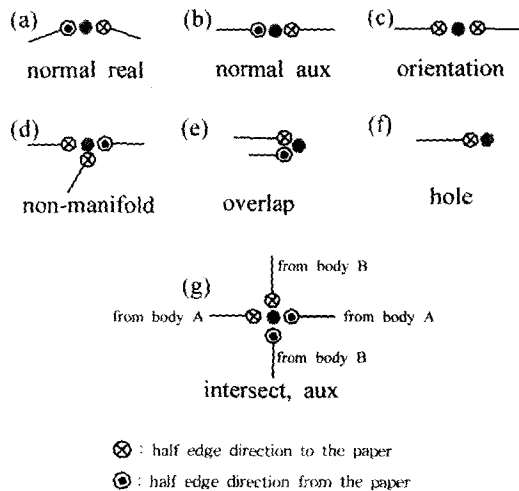


Fig. 3 Edge type classification

Editor는 이들 오류들이 그래픽의 화면상에 쉽게 표시될 수 있도록 각각 색을 적용하였고, 화면상의 오류가 표시되는 부분을 확인한 후 수동으로 편집할 수 있도록 하였다.

3. 사용자 그래픽 인터페이스(GUI)의 구축

3.1 개발도구의 선정

(1) 플랫폼의 선정

본 연구에서는 그래픽 인터페이스 기능이 있는 프로그램을 개발하려 하므로 많은 정점 데이터의 계산과 빠른 그래픽 처리가 요구된다. 따라서 정점 데이터 계산을 위해 부동 소수점 연산기능이 뛰어난 중앙처리장치와 그래픽 가속기능이 있는 Video Graphics Board를 사용하는 시스템을 선택하는 것이 타당하다. 따라서 이를 만족시키기 위해 Pentium II 266 MHz를 채택하고, OpenGL 가속 기능이 뛰어난 그래픽 보드인 FireGL3000을 사용하였으며 OS는 WindowsNT를 사용하였다.

(2) OpenGL의 사용

STL파일을 입력받아 화면에 도시하고 마우스를 이용하여 편집할 수 있는 환경을 구축하며, 대상물 표현을 위한 여러 가지 화면 처리를 한다. Borland C++ Builder를 사용하여 인터페이스(interface)를 설계하고, Graphic library인 Microsoft OpenGL을 사용해 shading, back face culling등의 화면표시에 대한 처리를 한다.

4. STL Editor의 주요기능

본 연구에서 개발된 STL Editor의 주요 특징 및 기능은 다음과 같다. STL 포맷을 화면에 표시하기 위한 viewing기능과 오류수정을 위한 편집 툴과 STL 포맷에 대한 정보들을 화면에 표시함으로써 기존의 상용 CAD와 유사한 환경 하에서 STL 포맷을 편집할 수 있도록 하였다.

4.1 Viewing을 위한 기능

입력된 STL파일을 시각적으로 확인할 수 있도록 꼭지점, 모서리, 삼각형을 OpenGL을 이용하여 각각 화면에 표시하며, 오류가 있는 모서리 부분은 색으로 구분하여 표시해 오류부분을 수동으로

편집할 수 있도록 하였다. 또한 상용 CAD소프트웨어인 CATIA의 키보드 및 마우스 조작을 참조하여 키보드를 이용한 zooming기능, 마우스를 이용한 rotation 및 부분확대 기능을 포함하고 있다. 또한 순차 선택을 위한 query select기능과 요소를 화면에 표시하지 않도록 하기 위해 Noshow/show 기능을 추가하였다.

4.2 Topology information

STL파일에 대한 각종 정보를 표시함으로써 직접 수치적으로 확인할 수 있도록 하였다.

STL파일의 전체 삼각형, 꼭지점, 솔리드의 개수를 표시한다. 또한 각 솔리드에 대해 shell의 개수, 삼각형, sharp triangle, 모서리, orientation error 모서리, overlapped error 모서리, hole error 모서리, nod-manifold error모서리의 개수에 대한 정보를 표시한다.

4.3 편집툴(Edit tools)

(1) Intersect two triangles & solids

두 삼각형 사이, 두 솔리드 사이의 교차연산을 수행한다.

(2) Break edges, break edge by vertex, break edge at center

모서리 상호간의 break, nearest vertex에 의한 break, 모서리 중심에서의 break 기능을 제공한다.

(3) Break triangle at vertex & at center

꼭지점에서의 삼각형 절단, 삼각형의 중심에서의 절단기능을 제공한다.

(4) Move vertex

한 꼭지점을 이웃하는 꼭지점으로 이동시키는 기능과 두 꼭지점을 중점으로 이동시키는 기능, 삼각형과의 intersect point로 이동시키는 기능으로 구분하였다.

(5) Extend edge

모서리 상호간의 연장과 모서리를 삼각형과의 intersect point로 연장시키는 기능을 포함한다.

(6) Swap orientation

삼각형의 방향을 바꾼다.

(7) Optimize triangulation

Delaunay 삼각형 분할[9]의 개념을 이용하여 이웃하는 삼각형 2개로 사각형을 구성하고 대각선에 대해 각 삼각형의 최소 각을 비교한 후 대각선을

결정하게 된다.

(8) Diet a Solid thru Append real edge

STL 포맷의 변환 과정 중 불필요하게 삽입되어진 꼭지점을 제거하는 기능이다. 꼭지점의 삭제는 두 가지경우로 나뉘며, 첫째는 꼭지점의 주위에 보조모서리만 있는 경우, 둘째는 꼭지점의 주위에 실모서리 있는 경우이다. 이 기능을 사용함으로써 STL 포맷의 크기를 대폭 줄일 수가 있다. 전체 솔리드와 일부분에 적용할 수 있도록 기능을 구분하였다.

(9) Erase tools

꼭지점, 삼각형, shell, connected triangles(solid), dangling triangles를 삭제할 수 있다.

(10) Boolean set operation

Union, Subtract, Intersection의 기능을 가지고 있다.

(11) Fill hole

삼각형이 누락되어진 부분을 채우는 기능이다.

4.4 허용공차(Tolerance)

공차를 적용하여 STL 포맷을 입력하는 과정에서 공차 이내의 꼭지점과 해당 삼각형을 데이터 베이스에 추가하지 않고 기존의 꼭지점으로 대체함으로써 입력 도중 데이터의 크기를 감소시킬 수 있도록 하였다.

거리(distance)와 각도(angle degree)에 대한 공차로 구분하였다.

5. 오류수정 시스템의 적용 예

Fig.4는 본 연구에서 개발한 STL Editor의 전체 화면을 나타내고 있다. STL 포맷을 표시하는 그래픽 창과 메뉴 창, 메시지 창으로 구성되어 있다. 메뉴 창은 위상정보(topology information) 표시기능, 편집툴(edit tools), 선택모드 스위치, 삼각형 정보, tolerance등의 기능으로 구성되어 있으며, 메시지 창에는 query selection 버튼, NoShow/Show 버튼 등의 기능을 포함하고 있다.

본 논문에서 유용성을 증명하기 위해 사용한 모델은 cam shaft이다. 이 모델은 Table 1에서와 같이 구멍오류와 비다양체 오류를 포함하고 있다. Table 1은 입력시와 수정후의 오류의 개수를 비교하고 있다.

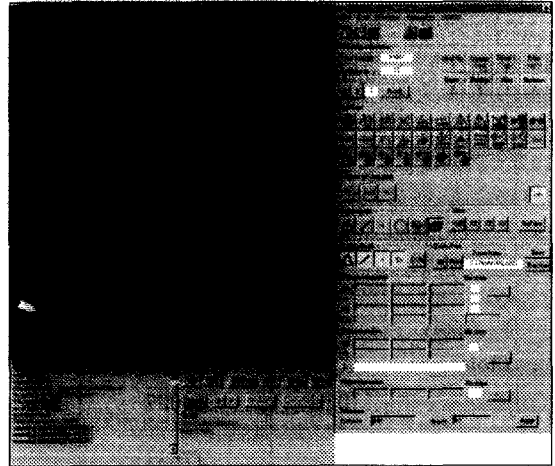


Fig. 4 Full screen of STL Editor

Table 2는 입력전의 original 모델과 입력시 tolerance를 적용한 경우, Diet를 적용한 후의 삼각형의 수를 각각 비교한 것이다.

Table 1 Comparison of no. of errors

	Original model	Modified model
Orient error	0	0
Overlap error	0	0
Hole error	595	0
Non-manifold error	7	0
no. of triangle	66976	17623

Fig.5는 날카로운 삼각형의 2개의 꼭지점간 거리를 나타내며, 입력 도중 tolerance를 적용해 제거할 수 있다.

Fig.6과 Fig.7은 STL Editor의 move vertex기능을 나타낸 것이다.

Fig.8은 서로 다른 솔리드의 삼각형 사이에 intersection을 적용하기 전이고 Fig.9는 적용한 후의 intersection line을 나타내고 있다.

Fig.10은 Fig.9의 과정에서 생성한 intersection line으로부터 시작해 두 솔리드 사이에 intersection

을 적용한 그림이다.

Table 2 Comparison of no. of triangle for each case

		No. of triangle
Original model		66976
Apply tolerance	0.001	66495
	0.005	66047
	0.01	64007
Apply Diet		17623

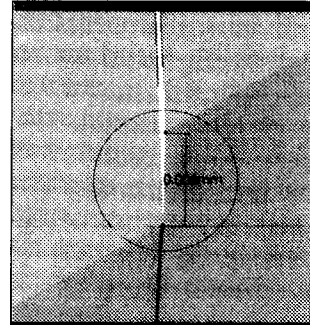


Fig. 5 Sharp triangle can be removed by applying tolerance

Fig.11과 Fig.12는 모서리에 대해 local optimization을 적용하기 전과 후를 나타내고 있다. 인접한 두 삼각형으로 사각형을 구성하고 각 삼각형의 최소각을 비교해 대각선을 결정한다. Fig.13은 솔리드에 대해 optimization을 적용하기 전이고 Fig.14는 적용한 후의 그림이다.

Fig.15는 Diet를 적용하기 전의 상태를 나타내며, Fig.16은 Diet를 적용한 후의 상태를 나타낸다. 삼각형의 수가 많이 줄어든 것을 알 수 있다.

Fig.17은 구멍 오류를 가진 삼각형을 나타내고 있으며, Fig.18은 구멍 오류가 있는 부분을 수동으로 수정한 그림이다.

Fig.19는 cam shaft상에 있는 cap 부분을 나타내고 있으며, 여러 가지의 복합된 오류를 포함하는 부분이다. 어두운 색으로 표시된 부분은 cap과 연결되어 있지 않은 면이며, cap은 cam shaft와 접촉하지 않고 있다. cap의 하면은 면이 누락되어 hole error를 형성하고 있다. Fig. 20은 cap의 앞면과 cap 사이에 교차연산을 수행한 것이다. Fig. 21은 불필요한 외부 삼각형을 삭제하고 orientation error를 수정한 것이다. Fig. 22는 cap과 cam shaft 사이에 교차연산을 수행한 후 나타난 non-manifold error를 표시해 주고 있다. cap 의 아랫면에 사각형 형상으로 나타난 모서리들이 error를 가지고 있는 모서리들이다. Fig. 23은 수정이 끝난 cap의 최종 형상이다.

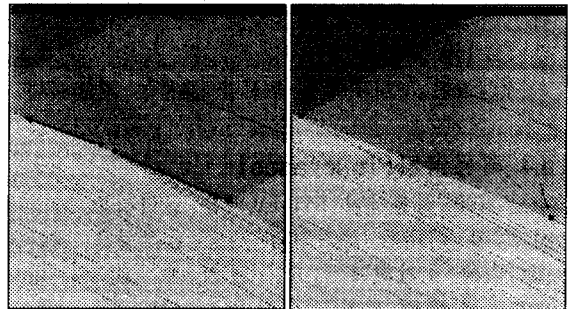


Fig. 6 Before moving vertices

Fig. 7 After moving vertices

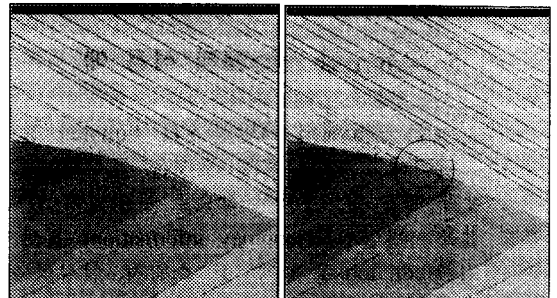


Fig. 8 Before intersection between two triangles

Fig. 9 After intersection between two triangles

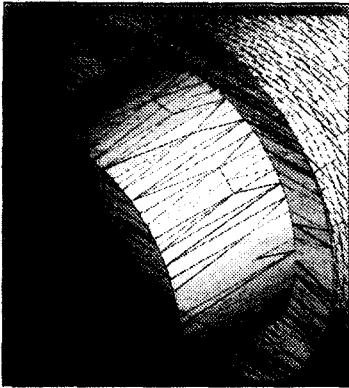


Fig. 10 After intersection
between two solids

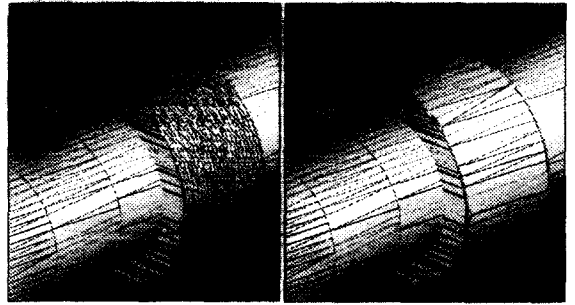


Fig. 15 Before diet solid Fig. 16 After diet solid

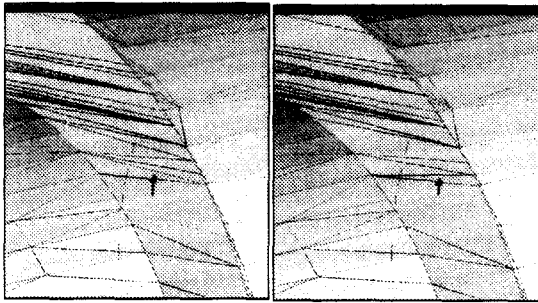


Fig. 11 Before optimizing Fig. 12 After optimizing
for an edge for an edge

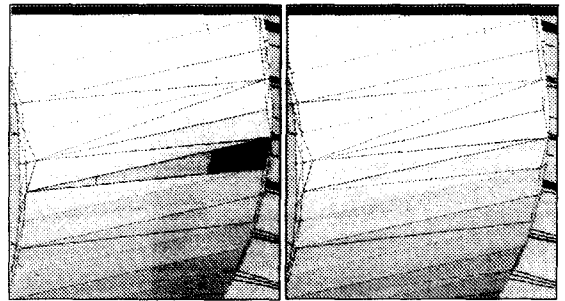


Fig. 17 Before modifying Fig. 18 After modifying
hole error hole error

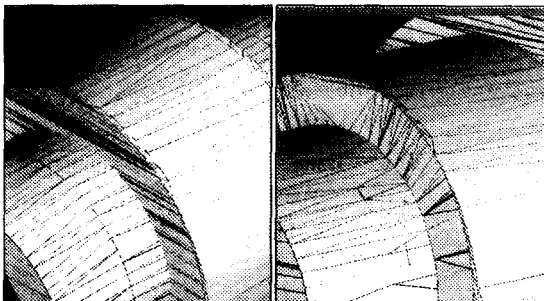


Fig. 13 Before optimizing Fig. 14 After optimizing
solid solid

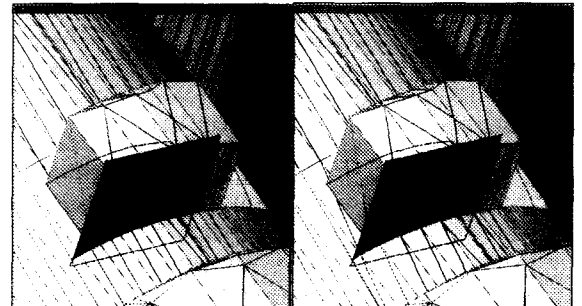


Fig. 19 Before modifying Fig. 20 After intersect
complex error containing orientation error,
hole error, and unnecessary facets. between front
facets and cap part.

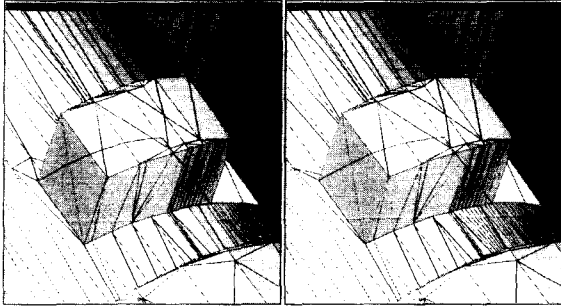


Fig. 21 After erase unnecessary facets and swap orientation

Fig. 22 Non-manifold error of cap part

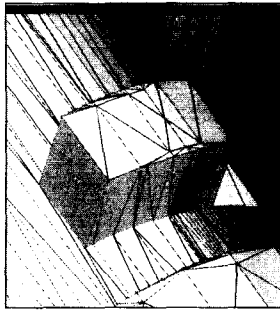


Fig. 23 After modifying complex error

6. 결론

STL 포맷은 삼각형의 세 정점의 좌표와 법선 벡터만으로 구성되어 있다. 따라서 본 연구에서는 삼각형 기반의 데이터 구조를 적용하였고, Windows 환경에 적합하도록 GUI를 이용하여 STL 포맷을 수정할 수 있는 STL Editor를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 소프트웨어의 특징은 다음과 같다.

(1) 메뉴에 이미지 아이콘(image icon)을 제공하여 사용자로 하여금 원하는 작업을 직관적으로 접근할 수 있게 했으며, 다양하고 사용하기 편리한 편집 툴을 제공한다. 특히 본 연구에서는 STL 파일이 가질 수 있는 에러들을 다양한 그래픽 환경을 통하여 사용자들이 시각적으로 쉽게 이해하고

편집할 수 있도록 하였다.

(2) 본 프로그램은 입력된 STL 파일에 대하여 다양한 위상정보를 제공한다. STL 파일은 단지 삼각형의 세 꼭지점과 법선벡터만을 가지고 있고, 그 외에 다른 위상정보를 가지고 있지 않다. 그러나 본 연구에서 개발한 프로그램은 STL 포맷을 데이터 베이스에 입력하는 과정에서 위상정보를 부여하여 솔리드 또는 삼각형 패치에 대한 위상정보를 화면상에서 확인할 수 있게 하였다.

(3) STL 포맷의 오류 및 형상을 시각적으로 표현하기 위하여 상용 소프트웨어에서 사용하는 그래픽 인터페이스(Graphic interface)를 제공한다. 즉, 축방향(XYZ, XZ, YZ, XY)의 뷰(view)를 제공하며, rotation, panning, zooming에 대한 마우스 및 키보드 컨트롤을 제공한다.

(4) 여러개의 솔리드로 이루어진 STL 포맷의 경우 각각의 솔리드를 화면상에 표시하기 위하여 Noshow/ Show 기능을 사용하였다.

(5) STL 포맷의 입력 과정 중 데이터의 크기를 줄이기 위하여 tolerance를 적용하여 tolerance이내의 꼭지점들은 이전에 데이터 베이스에 추가된 꼭지점으로 대체하였다.

(6) Diet기법을 사용하여 불필요한 점들을 삭제하였고, 그 과정에 Delaunay 분할법을 적용하여 STL 포맷의 질을 향상시켰다.

참고문헌

1. Rapid Prototyping Report, CAD/CAM Publishing, Inc., pp.4~6, January 1992.
2. 田中文基, 安浪建史, "光造形法における問題點とその解決法," 第6回 光造形システムシンポジウム, pp. 39~45, 1994.
3. M. M. Wozny, "Data Driven Solid Freeform Fabrication," IFIP Transactions B-3: Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing, pp. 71~82, 1992.
4. A. Dolenc, I. Mäkelä, R. Hovtun, "Better Software for Rapid Prototyping with INSTANTCAM," IFIP Transactions B-3: Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing, pp. 449~456, 1992.
5. Bloor, M.S., Brown, J., Dolenc, A., Owen, J., Steger, W.,

- "Data Exchange for Rapid Prototyping," Rapid Prototyping Journal Vol.1, No.1, 1995.
6. Imageware's Rapid Prototyping Module(RPM), http://boojum.iware.com/htmls/pro_desc.html
 7. DeskArtes Rapid Tools, http://www.sgi.com/Products/appsdirectory.dir/Applications/Mechanical_CAD/ApplicationNumber6181.html
 8. 채희창, "STL에 위상정보를 부여하기 위한 삼각형 기반 형상모델링," 한국정밀공학회지 제14권 제2호, 1997.
 9. Joseph O'Rourke, "Computational Geometry in C," pp. 175 ~ 177. 1994.