

삼각형기반 형상모델러를 이용한 STL의 검증

채희창*, 김동우*

Verification of STL using the Triangle Based Geometric Modeler

Hee-Chang Chae*, Dong-Woo Kim*

Abstract

The verification of the STL file is essential to build the confident parts using a RP machine, because the STL file obtained from the CAD software has many errors - the orientation of triangle does not coincide with adjacent triangles or some triangles are omitted, overlpped and so forth. Especially, the STL file translated from the surface model has more errors than those translated from the solid model.

In this study, all possible errors were classified with the most general form and the causes of errors were analyzed to verify and correct errors. Using the triangle based non-manifold geometric modeling, these errors were corrected. Especially, this study took the notice of the problem about the intersected triangles and non-manifold properties overlooked in the previous studies. But this study has a penalty on computing time of $O(n^2)$

Keywords : Rapid Prototyping(급속조형), STL Verification(STL 검증), Geometric Modeling (형상 모델링), Non-manifold(비다양체)

1. 서 론

제품개발 과정중에서 설계된 제품을, 시제품이 제작 되기 전에 확인하는 방법으로써 주요한 것중의 하나는 얻어진 부품모델링 데이터를 이용하여 조립을 컴퓨터상에서 수행하여 각종 부품의 간섭과 여유공간을 확인하는 digital mock-up이 있으며, 최근 국내에서도 자동차

회사를 중심으로 활발히 도입되고 있다. 그러나 digital mock-up은 모든 확인 과정이 화면상에서 수행되기 때문에 후에 설계를 검토하는 과정에서 실물을 놓고 검토하는 것에 비해 효율도가 떨어지게 된다. 특히 외관을 중요시하는 의장부품의 경우, 설계자의 촉감이 중요하기 때문에 digital mock-up만으로는 부족한 점이 많다. 급속조형(Rapid Prototyping: 이하 RP)은 설계검토

* 전북대학교 기계공학부

에 사용하기 위해 제품의 형상과 동일한 형상을 광경화성 수지, 종이 등을 이용하여 성형하는 것으로서 digital mock-up과는 대조되는 방법이다. RP중에서 가장 널리 사용되는 광조형법은 광경화성 수지를 레이저 광선으로 경화시켜 한층씩 쌓아서 성형하는 방법(layer by layer)으로 1987년 3D Systems Inc.에 의해 소개되었다.

3D Systems Inc.가 최초의 RP 기계를 출시했을 때 성형하려는 기하학적인 형상 데이터를 입력하기 위하여 STL (STereoLithography)을 도입하였다. STL은 모든 면을 삼각형으로 분할하여 면의 법선 벡터와 3개의 꼭지점의 좌표를 저장한 것으로, 꼭지점의 좌표가 중복해서 저장되는 등으로 인하여 데이터의 양이 많고 topology에 대한 정보가 없어 기하학적 정보의 전달수단으로써 부적절한 면이 많다. 그럼에도 불구하고 아직 이를 대체할 표준형식이 정해지지 않고 있으므로 RP업계에서의 실질적인 표준으로 사용되고 있다. 따라서 AutoCAD, Pro/ENGINEER, CATIA, I-DEAS 등의 CAD software에서도 STL translator를 지원하고 있는 상황이다. 또한 IGES, VDAFS, STEP, PDES 등의 CAD 교환 데이터를 STL 파일로 변환시키는 소프트웨어들이 개발되고 있다.

그러나 CAD로부터 얻어진 STL은 삼각형의 orientation이 인접 삼각형과 일치하지 않거나, 일부 삼각형의 누락, 중복이 나타나는 경우가 많기 때문에 오류를 검증하고 수정하는 것이 필수적이다. 특히 솔리드가 아닌 서피스 모델로부터 변환된 경우가 오류가 심하며 이를 검증하고 수정하기 위하여 StlView⁽¹⁾ 등의 소프트웨어가 개발되고 있다.

2. 관련연구

이에 대한 연구로써 Morvan S.M.등⁽²⁾⁽³⁾은 가상현실을 이용하여 STL을 확인하는 방법을 제안하였다.

Tanaka⁽⁴⁾등은 삼각형 patch 사이에 삼각형들이 빠져있는 구멍오류와 하나의 모서리 사이에 2개 이상의 facet이 중복되게 겹쳐 있는 경우에 있어서 점군 데이터를 2차원 평면에 투영하고 이를 Delaunay삼각형 분할을 하여 patch를 재구성하는 방법을 제안하였다.

최홍태⁽⁵⁾등은 삼각형 patch와 모서리에 대한 삼각형

의 인접정보를 링크리스트에 저장하고 구멍오류, 중복오류, 법선벡터 오류 등을 검증하고 수정하는 시스템을 개발하였으나, STL에 교차하는 삼각형이 있는 경우에 대한 언급이 없으며, dangling triangle 하나씩은 삭제하여 오류를 수정할 수 있으나 여러개의 삼각형으로 이루어진 면이 dangling된 경우 처리할 수 없는 단점이 있다. 즉 삼각형이 다수가 모여진 면을 다룬 것이 아니고 개별 삼각형만을 다룬 것이 단점이다.

실제 RP에서 성형할 대상은 다양체이며, 완전한 STL도 모서리 하나에 인접한 삼각형이 2개가 되어야 한다는 조건을 만족하지만, CAD에서 얻어진 오류가 많은 STL이 이러한 조건을 만족하기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 간과한 교차하는 삼각형 문제와 비다양체적인 특성에 주목하여 STL에 나타날 수 있는 모든 오류를 분석하고, 이를 해결하기 위하여 삼각형 기반의 비다양체 형상모델러를 적용하여 STL의 오류를 검증하는 일반적인 방법을 제시하고자 한다. 단 구멍오류에 대해서는 이미 Tanaka⁽⁴⁾, 최홍태⁽⁵⁾ 등이 Delaunay삼각형 분할법을 이용한 구멍오류의 수정에 대하여 연구하였으므로 본 연구에서는 다루지 않았다.

3. STL의 오류분류 및 검증방법

3.1 입체가 형성될 조건

STL의 오류에 대해서 논의하기 전에 경계표현(B-rep)에서의 입체가 형성될 조건(well-formedness)에 대해 기술하고 이를 STL의 검증에 적용하고자 한다. Eastman⁽⁶⁾등은 B-rep에서의 well-formedness를 규정하였는데, 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 면을 삼각형으로 분할하였을 때, 꼭지점 및 공유 모서리를 제외하고 어느 곳에서도 교차하지 않아야 한다(삼각형 분할조건)(Fig.1)

(2) 피비우스의 따같이 면의 방향이 변하지 않아야 한다(면의 방향성:orientability)

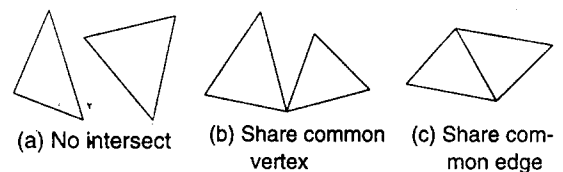


Fig. 1 Valid triangulation

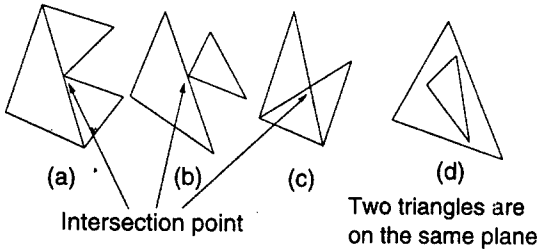


Fig. 2 Invalid triangulation

삼각형 분할조건은 Fig.2와 같이 모서리의 일부분만을 공유하거나(Fig.2(a)(b)(c)), 삼각형의 내부에 포함되어 있는 경우(Fig.2(d))를 허용하지 않으며, 면의 방향성 조건에 의하여 모서리에 인접하는 삼각형의 반모서리(half edge)가 서로 반대 방향이 되어야 함(Fig.3)을 의미한다. 이들 조건은 2-manifold의 경우에 해당하는 것으로서, 면의 방향성을 non-manifold 경우까지 포함하도록 확장할 수 있다.

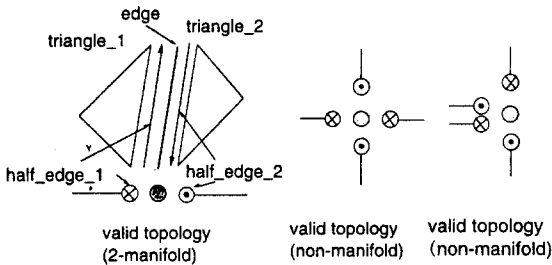


Fig. 3 Valid topology

3.2 오류의 분류

불완전한 STL이 가질 수 있는 오류를 다음과 같이 구분할 수 있다.

(a) 꼭지점의 중복 오류

삼각형의 3개의 꼭지점이 동일하거나, 2개의 꼭지점이 동일한 경우, 또는 삼각형의 3변중 2변이 이루는 삼각형의 각도가 작으나 한 점은 떨어진 경우에 해당한다. 삼각형의 세점의 위치벡터를 P_0, P_1, P_2 라 할때 반올림 오차를 고려하여 다음과 같은 경우이다.

(b) 예각삼각형 오류

3개의 꼭지점 좌표가 다르지만 일직선상에 존재하기

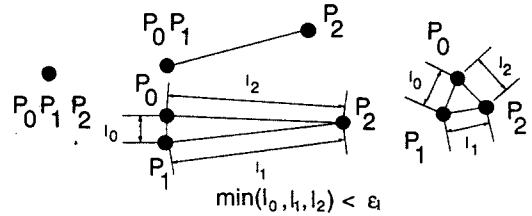


Fig. 4 Overlapping(Vertex) error

때문에 삼각형이 만들어질 수 없는 경우이다. 또한 반올림 오차를 고려하여 예각삼각형이 얻어지는 경우 집합연산 또는 슬라이싱할 때 문제가 발생하므로 이를 반드시 확인하고 STL 처리 전에 필터링을 하여야 한다.

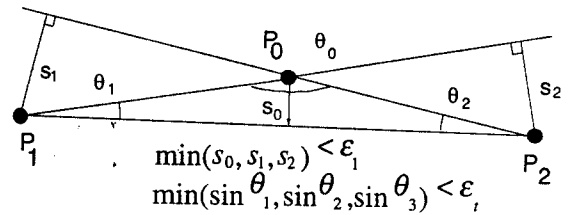


Fig. 5 Acute triangle error

(c) 상관오류(intersection error)

삼각형 분할조건에서 언급된 삼각형 사이에 상관선이 생긴 경우이다. Fig.2(a)(b)(c)에서와 같이 모서리를 부분적으로 공유하는 것도 상관하는 것으로 간주한다. 또한 Fig.2(d)에서와 같이 삼각형 내부에서 상관선이 생긴 경우에는 상관선을 기준으로 해당 삼각형을 분할해 둘 필요가 있다.

상관오류는 삼각형 1-2-3이 예각삼각형이 되는 경우에 종종 발생하며 상관선에 의해 삼각형 1-4-2를 분할해 줌으로써 오류를 수정할 수 있다. Fig.6과 같은 예각 삼각형이 있는 경우 STL 자료를 필터링할 경우, 반올림 오차를 고려하지 않는다면 뒤에 나오는 구멍오류로 볼 수 있지만 반올림 오차를 고려하면 상관오류라고 볼 수 있다.

(d) 중복 오류(overlap error)

2개의 삼각형이 완전 일치하는 경우이다. 넓은 의미에서 상관오류라고 볼 수 있으나 상관을 확인하지 않아도 된다는 점에서 별도로 분리하였다.

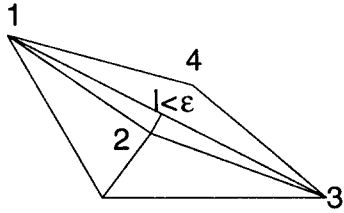


Fig. 6 Intersection error

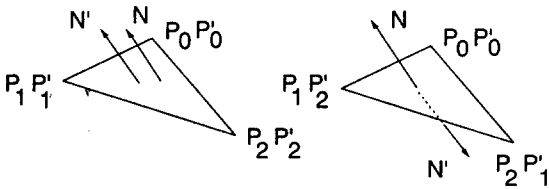


Fig. 7 Overlapping error

(e) 방향 오류(orientation error)

방향 오류는 Fig.8과 같이 삼각형 하나만이 orientability를 만족하지 못하는 simple orientation error와 여러개의 삼각형이 모인, 면 전체가 방향오류를 일으키는 complex orientation error로 분류할 수 있다.

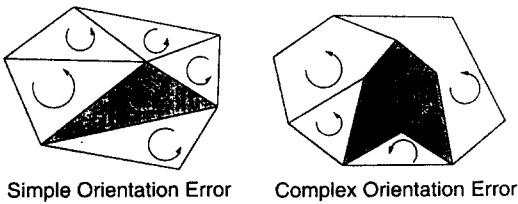


Fig. 8 Orientation error

(f) 구멍 오류(hole error)

삼각형의 누락으로 인하여 모서리에 인접한 삼각형이 자신 이외에는 없는 경우이다.

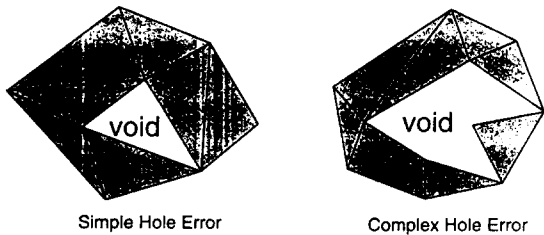


Fig. 9 Hole error

(g) 비다양체 오류(non-manifold error)

구멍 오류와는 달리 모서리에 인접한 삼각형이 2개 이상인 경우이다. Fig.10(a)(b)의 dangling triangle이나 dangling face가 있는 경우와 Fig.10(c)(d)의 서로 마주보는 face가 있는 경우에 나타날 수 있다. Fig.10(c)는 상관오류와 비다양체 오류가 동시에 나타나는 경우이며, Fig.10(d)는 상관오류 또는 중복오류가 비다양체 오류와 동시에 나타날 수 있다.

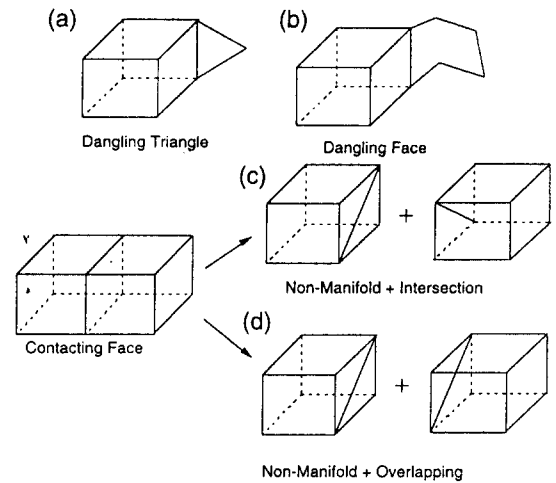


Fig. 10 Non-manifold error

이 경우는 SLA에서 문제가 없을 수도 있지만 LOM에서는 문제가 될 수 있다. 이들은 CSG로부터 STL을 얻는 과정에서 집합연산이 실행되지않아 종종 발생한다.

4. 삼각형의 상관과 삼각형 기반 형상모델링

위의 상관오류 및 비다양체 오류 등을 처리하기 위해서는 삼각형 사이의 상관을 구하고 상관선을 기준으로 삼각형을 분할해 주어 삼각형 분할 조건을 만족시키는 것이 필요하다. 상관에 의하여 삼각형을 분할하는 작업은 통상 집합연산에 필수적인 작업이며 삼각형기반 형상모델러의 기본적인 기능중의 하나이다. 따라서 STL의 검증에도 단순 리스트 구조를 사용하는 것이 아닌 삼각형기반 비다양체 형상모델러를 본 연구에서는 사용하였다. 또한 이런 작업을 위해서는 삼각형과 한 점 사이의 위치를 판별하는 일이 중요하며, 반올림 오차의 영향을

크게 받기 때문에 본 연구에서는 무차원화된 barycentric coordinate를 사용하였다. 그래도 예각삼각형의 경우에는 불완전한 결과를 얻을 수 있으므로 주의를 요한다.

4.1 삼각형기반 비다양체 모델러의 데이터 구조

Fig. 11은 본 연구에서 사용한 삼각형 기반 비다양체 모델링의 데이터 구조⁽⁷⁾를 나타낸 것이다. 이는 STEP의 EXPRESS-G⁽⁸⁾⁽⁹⁾를 사용하여 기하학적 실체(entity) 사이의 정보흐름을 표현하였다.

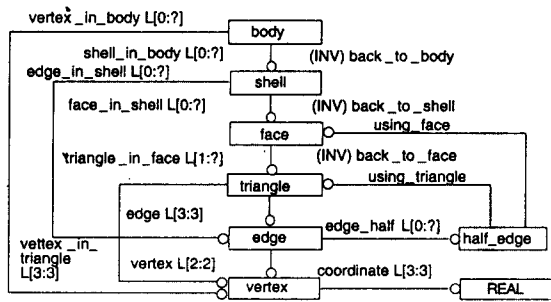


Fig. 11 Data structure of triangle based modeling

기하학적 위상구조중에서 가장 상위에 위치하는 것은 body이며 하나의 솔리드 또는 서피스 패치가 될 수 있다. shell은 연속된 면들로 구성된 것을 말한다. 하나의 솔리드가 1개의 shell로 이루어 질 수도 있고 속이 비어 있는 솔리드의 경우 2개의 shell로 구성된다.

face에는 면을 삼각형으로 분할하여 평면의 방정식과 아울러 저장한다.

edge에는 2개의 vertex와 이에 인접하는 삼각형의 half-edge 리스트를 가르키는 포인터를 저장한다. half-edge에는 해당 반모서리가 속한 삼각형과, 면을 가르키는 포인터를 저장한다. 이때 half-edge들은 모서리를 기준으로 방사상 모양의 순서로 저장된다. 즉, 첫 번째 삼각형의 법선벡터의 방향을 양으로하여 나머지 삼각형들의 각도를 구한 후 각도순으로 배열한다.

4.2 삼각형의 상관과 삼각형 분할

2개의 삼각형 사이의 상관선을 구하기 위해 Fig. 12과 같이 일단 삼각형 A가 속한 평면과 삼각형 B와의 상관선 P-Q를 구한 후 P-Q 중 삼각형 A의 외부에 있

는 부분을 절단하여 버리고 내부 및 경계에 있는 부분 R-S를 구한다. 얻어진 상관선 R-S를 이용하여 Fig. 12와 같이 삼각형을 분할해 둔다. STL의 삼각형을 데이터구조에 저장하기 전에 기존의 저장된 삼각형과 상관을 시켜 상관선을 따라 삼각형을 분리하므로 $O(n^2)$ 의 상관을 구하여야 한다.

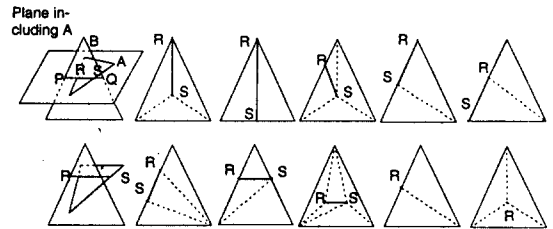


Fig. 12 Splitting the triangle along the intersection line

4.3 모서리(edge)의 분류

모든 STL의 삼각형을 다른 삼각형과 상관시킨 후 데이터구조에 저장한 후 모서리 주위에 방사상으로 저장된 반모서리(삼각형)을 조사하여 Fig. 13과 같은 모서리 형태를 결정한다. 여기서 Aux와 Real의 경우에는 정상적인 모서리이며 Hole, Orientation, Non-manifold인 경우에는 비정상적인 모서리이다.

- Aux : 동일 평면 상에서 삼각형 분할시 생기는 모서리로서 보조모서리. 맞닿는 경우에도 적용
- Real : 방향은 같지만 동일 평면이 아닌 경우로 면과 면이 만나서 생기는 모서리. 맞닿는 경우에도 적용
- Non-manifold : 한 모서리에 2개 이상의 반모서리가 존재하는 경우 중에서 Real과 Aux가 아닌 경우
- Hole : 한 모서리에 반모서리가 1개만 존재하는 경우로 hole error을 일으키는 모서리
- Orientation : 한 모서리에 반모서리가 2개 존재하지만 orientation이 다른 경우

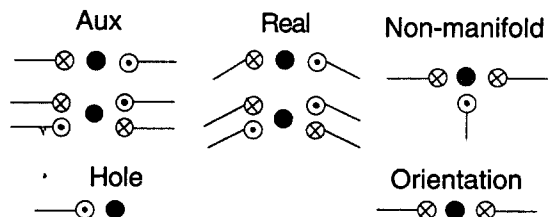


Fig. 13 Edge type classification

5. STL의 오류 수정

STL의 오류 중에서 꼭지점의 중복오류와 예각삼각형 오류, 상관오류, 중복오류는 이미 삼각형을 상관시켜 삼각형 분할하여 데이터 구조에 저장하는 과정에서 모두 자동적으로 없어지며 방향오류, 구멍오류, 비다양체 오류는 계속 남아있게 된다.

다음과 같은 단계를 거쳐 STL의 오류를 수정할 수 있다.

- 1 단계 : 상관 후 데이터 구조에 저장
- 2 단계 : simple orientation 오류 수정
삼각형의 3 모서리의 형태가 모두 orientation 인 경우 삼각형 꼭지점의 순서를 바꾸어 데이터 구조를 수정한다.
- 3 단계 : dangling triangle의 제거
삼각형의 3모서리의 형태가 1개는 non-manifold이며 나머지 2개가 hole인 경우 이를 데이터 구조에서 삭제한다.
- 4 단계 : 맞는 삼각형 제거
삼각형 중에서 꼭지점의 순서만 바뀐 삼각형이 동시에 존재할 경우 두 삼각형 모두 삭제한다.
- 5 단계 : 삼각형의 재분할
각 변을 Delaunay 삼각형 분할을 적용하여 삼각형을 재분할 함으로써 STL의 질을 높일 수 있으며 1~3 단계 수정의 결과를 반영한다.
- 6 단계 : 비정상 모서리를 따라 면의 분할.
면 단위로 STL의 오류를 수정하기 위하여 모서리 형태가 Hole, Orientation, Non-manifold 인 모서리를 따라 절단하여 여러개의 면을 만든다.
- 7 단계 : 분할된 면의 조합
6단계에서 분할된 면(n 개)을 각각 +(주어진 면의 orientation), -(면의 orientation을 반대로), 0(면을 삭제)로 하여 시행착오법을 사용하여 tessellation함으로써 최적의 STL을 구한다. 그러나 이 단계에서는 자동으로 처리하는 것보다는 화면에 도시하여 수동으로 처리하는 것이 바람직하다.
- 8 단계 : Hole error의 처리
Delaunay 삼각형분할에 의한 Hole error의 수정

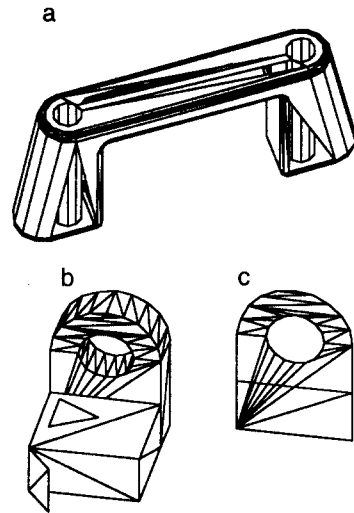


Fig. 14 The STL models used in this study

6. 적 용

Fig. 14는 본 연구에서 예제로 사용한 STL을 화면에 도시한 것이다. 이들은 Pro/Engineer에서 모델링하여 STL로 변환한 것이다. Fig. 14(a)는 4개의 삼각형을 인위적으로 누락(양쪽 다리에서 2개, 상부의 빔에서 2개)시킨후 미세부분을 나타나게 하기 위해 보조모서리를 제거한 상태를 나타내고 있다. Fig. 14(c)는 부분적으로 맞는 2개의 입체를 만들고, 그중 한 면의 orientation을 반대로 바꾸고, dangling face 2개와 중복된 삼각형 1개를 인위적으로 merge한 것이다. 그중 한 개의 dangling face는 아래의 block 내부에 있어서 나타나 있지 않다. Fig. 14(c)는 맞는 면 부분을 나타낸 것이다.

Fig. 15는 Fig. 14(a)에 포함되어있는 오류를 수정한 후 화면에 나타난 결과이다. Fig. 15(a)는 4개의 구멍 오류를 수정한 상태이며, Fig. 15(b)는 가시성을 높이기 위해 보조모서리를 제거한 결과이다.

Fig. 16은 상관을 시키고 5절의 1~5 단계까지를 수행한 결과이다. Delaunay 삼각형 재분할에 의해 원래의 patch보다 양호한 patch가 생겼음을 보여주고 있다.

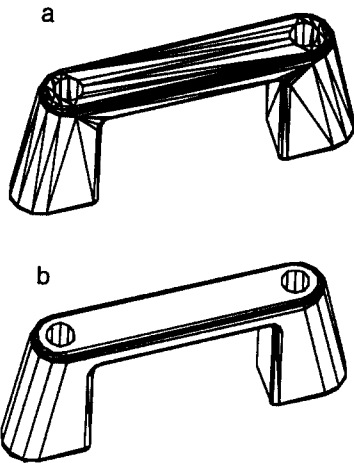


Fig. 15 The results correcting Fig. 14(a)

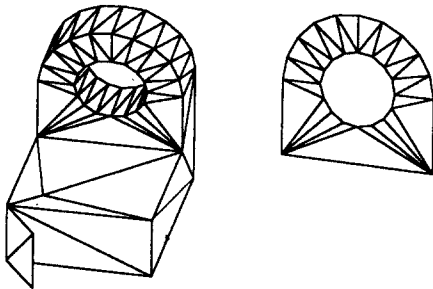


Fig. 16. Results after 5 steps

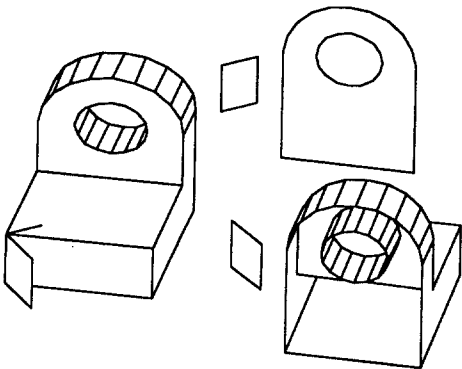


Fig. 17 Separation of faces along invalid edges

Fig. 17은 6단계의 결과를 화면에 도시하였으며, 여기서 2개의 dangling face와 orientation이 바뀐 면이 있음을 알 수 있다. 이중 dangling face 2개는 삭제하고 orientation이 바뀐 면을 orientation을 바꾸어 gluing하면 오류가 없는 STL을 얻을 수 있다.

7. 결 론

삼각형기반 비다양체 형상모델러를 이용하여 STL의 오류를 검증하는 가장 일반적인 방법을 제시하였으며, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) STL이 정밀도가 좋지않고 예각삼각형이 있는 경우가 많으므로 STL의 검증에 단순히 orientation과 인접한 삼각형 갯수만으로 처리해서는 안되고 반드시 상관을 확인하여야 한다.

(2) STL의 검증에 상관을 처리할 수 있는 삼각형기반 비다양체 형상모델러를 사용하는 것이 매우 유용하다.

(3) 단점으로는 $O(n^2)$ 의 상관계산이 필요한 점 들 수 있다.

참고문헌

1. StlView, <http://lff.me.utexas.edu/>
2. Morvan S.M., Fadel G.M., "Virtual Prototyping Using STL Files," International Body Engineering Conference/IBEC 1996, Cobo Exposition Center, October 1-3, 1996, Detroit, MI.
3. Morvan S.M., Fadel G.M., "IVECS, Interactive Correction of .STL Files in a Virtual Environment," Solid Freeform Fabrication Symposium, August 12-14, The University of Texas at Austin, Austin, TX.
4. 田中文基, 岸浪建史, "光造形法における問題点とその解決法", 第6回 光造形システムシンポジウム, pp. 39~45, 1994
5. 최홍태, 이석희, "금속조형시스템을 위한 STL 포맷의 오류검증에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제13권 10호, pp.46~55, 1996

6. Eastman, C.M., Preiss, K. : "A Review of Solid Shape Modeling Based on Integrity Verification" Computer-Aided Design, Vol. 16, No.2, pp. 66~80,1984
7. 채희창, "고속시작 시스템을 위한 삼각형 기반 형상 모델링", 한국정밀공학회 96년도 춘계 학술대회논문집, pp. 587~591, 1996
8. Schenck, D., Wilson, P., "Information Modeling the EXPRESS Way"
9. ISO 10303-11, "EXPRESS Language Reference Manual"