

# 리버스 엔지니어링으로 생성된 데이터를 이용한 쾌속 조형 기술 연구

우혁제\*, 이관행\*

## Rapid Prototyping from Reverse Engineered Geometric Data

Hyuckje Woo\* and Kwan Heng Lee\*

### ABSTRACT

The design models of a new product in general are created using clay models or wooden mock-ups. The reverse engineering (RE) technology enables us to quickly create the CAD model of the new product by capturing the surface of the model using laser digitizers or coordinate measuring machines. Rapid prototyping (RP) is another technology that can reduce the product development time by fabricating the physical prototype of a part using a layered manufacturing technique. In reverse engineering process, however, the digitizer generates an enormous amount of point data, and it is time consuming and also inefficient to create surfaces out of these data. In addition, the surfacing operation takes a great deal of time and skill and becomes a bottleneck. In rapid prototyping, a faceted model called STL file has been the industry standard for providing the CAD input to RP machines. It approximates the CAD model of a part using many planar triangular patches and has drawbacks. A novel procedure that overcomes these problems and integrates RE with RP is proposed. Algorithms that drastically reduce the point clouds data have been developed. These methods will facilitate the use of reverse engineered geometric data for rapid prototyping, and thereby will contribute in reducing the product development time.

**Key Words** : Rapid prototyping(쾌속 조형), reverse engineering(역설계공학), point cloud data reduction(점 데이터 감소), STL file(STL 파일)

### 1. 서론

최근 시장의 경쟁력을 높이고 고품질의 신제품을 더욱 빠른 시간에 개발하기 위해 Rapid Prototyping(RP) 과 Reverse Engineering (RE) 기술이 많이 이용되고 있다.

Reverse Engineering(RE)기술은 접촉식 또는 비접촉식 측정방법을 통하여 파트형상의 점 데이터를

를 생성하고 이를 처리하여 3차원 CAD모델을 만드는 일련의 과정을 말한다. RE 기술은 여러 가지 경우에 사용될 수 있는데, 특히 CAD 데이터를 갖고 있지 않은 또는 CAD 데이터가 변경된 파트의 설계 및 제조에 대해 응용하고자 할 경우나 아주 오래된 파트를 복원 또는 제작하고자 할 경우 CAD 모델이 꼭 필요하게 된다. 이러한 경우 RE 기술은 많은 노동 집약적인 일의 감소가 가능하게

\* 광주과학기술원 기전공학과

하며 단순 작업도 피할 수 있게 되어 매우 효과적으로 이용되어질 수 있다.

쾌속 조형(Rapid Prototyping : RP) 기술이란 짧은 시간 내에 CAD 데이터로부터 3차원 형상의 시제품을 만들어내는 기술을 말하는데 RP 기술을 사용하여 실제 파트를 만드는 과정은 데이터 준비 단계, 모델 제작 단계, 후처리 단계의 3단계로 나눌 수 있다. 먼저 데이터 준비 단계에서는 3차원 CAD 소프트웨어 상의 모델을 RP장비의 표준 입력 파일인 STL 파일로 변환하는데 이 STL 파일은 모델의 표면을 작은 삼각형 패치(patch)들로 근사화한 파일이다. 모델 제작 단계에서는 STL 파일을 일정한 작은 두께로 단면화하여 실제 모델을 제작하게 된다. 따라서 RE 기술과 RP 기술을 연관하여 생각할 경우 측정된 점 데이터를 곧바로 RP에 적용하기 위해서 사용되어질 수 있는 방법은 Fig. 1과 같이 3가지 방법으로 요약 될 수 있다.

먼저 기존에 가장 많이 사용되는 방법으로 측정 점 데이터로부터 CAD 곡면 모델 생성 후 이를 STL 파일로 변환하여 RP 파트 제작을 위한 슬라이스 파일을 생성하는 방법(Fig. 1①)을 생각할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 정확한 CAD 모델 제작의 어려움, 많은 시간의 소요, 작업자의 노력 및 기술 필요, 광대한 데이터량 등의 문제점을 안고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고 보다 효율적인 다른 방법으로 측정 점 데이터로부터 삼각형 패치를 형성하여 STL 파일을 만들어 RP 기술에 응용하는 연구가 수행되었다(Fig 1. ②).

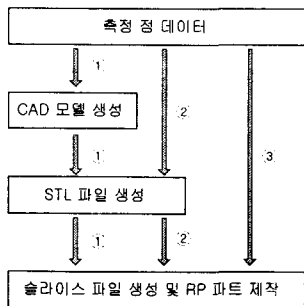


Fig. 1 Methods for Bridging RE and RP

하지만 이 방법 역시 측정된 점 데이터로부터 STL 파일을 직접 정확히 생성하는 것은 매우 어렵고 또한 STL 파일에는 다음과 같은 문제점들을 안고 있다.

1. 많은 삼각형 패치로 인해 표면 근사화에 따른 STL 파일 크기가 증가된다.
2. 모든 곡면을 삼각형 입자로 표현하여야 하므로 그에 따른 정밀도 보장이 어렵다.
3. 정밀도를 유지하며 근사화를 하여야 하므로 삼각형의 한 면이 너무 작아져서 직선과 같은 비특이 형상이 생성될 수 있다. 그리고 이때 STL 파일에서 구멍(gap), 중복(doubling), 겹침(overlapping), 잘못된 방향성(malorientation) 등이 발생할 수 있다.
4. 부정확한 법선 벡터로 인한 잘못된 모델 인식이 발생할 수 있다.
5. STL 파일은 CAD 시스템에서 만들어진 모델을 근사화하므로 이 모델에 관한 형상(geometry) 정보와 위상(topology) 정보를 잃게 된다

따라서 이러한 점들을 고려해 볼 때 곧바로 RP 파트 제작을 하는 방법(Fig. 1③)에 대한 연구가 필요하고 이 절차가 개발되면 작업 절차의 단순화가 가능해지고 신속한 RE-RP 생산 시스템을 구성할 수 있다. 또한 위에서 언급한 STL 파일의 문제점 해결을 기대할 수 있다. 이러한 새로운 공정을 개발하는 연구와 동시에 다른 한편으로, 레이저 스캐너와 같은 광대한 측정 점 데이터를 생산해 내는 측정장비 발전과 더불어 데이터를 효과적으로 줄여 사용하는 연구도 필요하다.

지금까지는 RP와 RE 두 기술을 절목시켜 하나의 시스템을 구축하는 내용에 대한 연구는 매우 미비한 상태이나 이에 관한 최근 발표된 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Hosni, et al.<sup>(3)</sup>은 이 비접촉식 측정 방법을 사용하여 RP 파트 제작을 시도하였다. 여기서는 곡면 모델을 완성한 후 STL 파일을 이용하여 RP로 실제 파트 제작을 하였다. Schoene와 Hoffmann<sup>(6)</sup>은 곡면 모델을 거치지 않고 직접 점 데이터로부터 STL 파일 생성을 시도하였다. 그리고 이러한 과정을 수행하는 중에 STL 파일 생성시 자주 발생하는 문제점들을 지적하였다. Chen과 Ng<sup>(1)</sup>는 CMM으로 측정된 점 데이터로부터 STL 파일을 자동으로 생성하는 방법을 언급하였고 생성된 데이터의 감소(data reduction)공정을 수행하여 사용자가 정의하는 만큼의 삼각형 면들의 감소를 이루고자 하였다. Vail, et al.<sup>(9)</sup>은 CCD 카메라를 사용하여 3차원 측정 점 데이터를 구성하여 점 데이터로부터 직접 STL 파일로 변환하여 RP에 적용하는 방법을 소개하였고 공정을 간단히 하는

방법으로 STL 파일 생성시 발생하는 문제점들을 지적하여 이를 해결하기 위해 후처리 과정을 제시하였다. Jamieson과 Hacker<sup>(4)</sup>와 Qiming과 Yungan<sup>(7)</sup>은 CAD 모델을 삼각형 면들로 표현하는 기존의 STL 파일을 이용하는 방법과 CAD 모델을 direct 단면화 방법의 장단점을 비교하였고 기존의 삼각형 격자화(tessellation)로 인하여 발생하는 STL 파일의 문제점을 지적하고 direct 단면화 방법을 사용해야 하는 이유를 설명하였다.

위 연구들의 장점과 문제점들을 분석하여 본 연구에서는 RE-RP 두 기술을 연계하여 보다 효율적으로 제품을 생산할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. RE와 RP의 통합 시스템

본 연구에서는 곡면 모델을 만들지 않고 측정된 점 데이터로부터 데이터 감소 공정을 거쳐 직접 단면화 데이터를 제작하여 RP 시스템에 입력하는 공정을 개발하였다. 다음 Fig. 2는 전체 공정 순서를 보여주고 있으며 이에 대한 자세한 공정 내용은 단계별로 아래에 상세히 설명하였다.

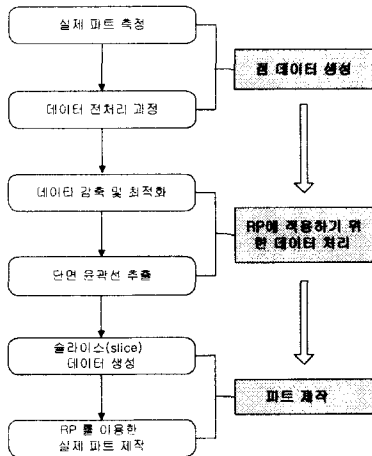


Fig. 2 A New Procedure For Bridging RE and RP

### 2.1 실제 파트의 측정

측정 데이터를 얻기 위해서는 여러 가지 상용 장비들이 사용될 수 있는데 최근에는 레이저 스캐너 사용이 점차 늘고 있다. 본 연구에서는 우선 완전한 측정 데이터가 얻어진 것을 가정하였는데

정확한 측정 데이터를 얻는 과정에 대해서는 따로 많은 연구들이 진행되어지고 있다. 이러한 연구에서는 측정 데이터로부터 잘못된 점 데이터의 제거 (spike removal), 모델을 나누어 측정 후 조각들을 일치시키며 다시 원래 모델을 완성하는 작업 (registration), 끊어지거나 겹친 부분을 하나로 이어주는 작업(merging)등의 전처리(preprocessing) 작업이 이루어져야 한다.<sup>(10)</sup> 이러한 데이터 전처리 과정을 통해 얻어진 측정 점 데이터는 완전한 형상을 포함하기 위해서 파트 전체에 대해 매우 밀도가 높고 상당히 많은 양으로 이루어진다. 하지만 RP 기술을 사용하여 파트를 제작할 때는 일정한 두께의 재료를 한 층씩 차례로 적층하기 때문에 일정 간격의 단면 데이터가 필요하게 된다. 이러한 점을 고려하여 처음 얻어지는 측정 데이터로부터 RP제작에 필요한 단면 데이터를 생성할 수 있다면 RP 공정에 직접 응용이 가능하다. RE 기술로 측정되는 점 데이터는 각각의 측정 장비에 따라 다르게 얻어 질 수 있다.

최근 발달된 3차원 레이저 측정 장비의 경우 레이저 모양이 선분을 이루고 있어 측정 과정에서 측정 선분 간의 간격을 조정함으로써 곧바로 일정 간격의 파트 단면 데이터를 획득이 가능하기도 하다. 또한 여러 3차원 측정 장비로부터 얻어지는 데이터 외에 CT 이미지, MRI 등과 같은 데이터는 처음부터 단면 데이터로 구성되어 직접 응용될 수 있다. 하지만 다른 측정방법을 이용한 경우나 다른 방식의 측정시스템의 경우 단면화되지 않은 일반적인 점 데이터가 얻어지게 된다. 따라서 측정 점 데이터의 경우 Table 1과 같이 크게 단면화된 측정 데이터와 단면화되지 않은 측정 데이터로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 단면화 되지 않은 측정 데이터의 경우 파트의 형상정보를 잃어버리지 않기 위해 충분히 조밀한 점들로 구성되어 있다고 가정하였고 측정 데이터 획득 과정에서 생기는 noise는 모두 전처리 과정에서 제거되었다고 가정하였다.

Table 1 Categorization of Scanned Data Type

형태	점 데이터 구분	획득 가능한 측정 방법
Type I	단면화된 측정 점 데이터	CT, MRI, Laser line scanner, etc.
Type II	단면화되지 않은 측정 점 데이터	CCD camera, CMM, Laser scanner, etc.

## 2.2 점 데이터 제거 공정

측정 데이터가 아무리 조밀한 점 데이터로 구성되어 있다 하더라도 RP 공정은 실제 파트를 일정 두께의 단면으로 근사화한 파트를 제작하게 된다. 따라서 RE에서 얻어진 데이터를 RP제조 공정에 응용하기 위해 모든 데이터가 유지될 필요가 없고 실제적으로 아주 정밀한 surfacing 작업도 필요하지 않다. 이러한 이유로 측정 데이터 중 이웃하는 단면간에 선형성을 이루고 있는 경우 RP 파트 제작을 위한 slice파일 생성시 충분히 복원될 수 있으므로 제거하고 RP 파트 제작에 꼭 필요한 데이터만 추출하였다. 점 데이터 제거 방법으로 뒤에서 자세히 설명할 homotopy 방법을 이용하였다. 일반적인 파트는 그 형상에 따라 크게 quadric 곡면을 포함한 파트와 자유곡면(freeform)을 갖는 파트로 나눌 수 있는데, 데이터 제거 공정을 거쳐 RP 제작에 꼭 필요한 데이터만 남게 되므로 quadric곡면을 포함한 파트의 경우는 매우 효과적인 데이터 감소를 기대할 수 있고 자유곡면을 포함한 파트의 경우 부분적으로 선형성이 유지되는 구역에서 데이터 감소를 기대할 수 있다. 하지만 측정 데이터로부터 직접 RP파트 제작하는 이 공정에서는 완전 자유형상 파트의 경우 데이터가 제거되면 결국 파트의 정보를 잃거나 근사화하는 경우가 되므로 적합하지 않다. 이런 경우는 데이터 감소의 장점보다는 곡면 모델을 생성하지 않는다는 점에서 장점을 얻을 수 있다. 데이터 제거 공정은 Fig. 3과 같은 절차에 의해서 수행된다.

먼저 측정된 데이터로부터 파트의 곡률 정보를 미리 추출하여 이를 근거로 하여 크게 subregion을 나누고 subregion별로 데이터 선형성 여부를 검사하게 된다. 그 각 subregion의 양끝 단면 데이터와 subregion 내부에 존재하는 점 데이터를 비교하여 선형성이 유지되면 subregion 내부 데이터 제거가 가능하고 subregion 양끝 데이터만 유지되게 된다. 하지만 선형성이 유지되지 않으면 다시 내부 subregion을 선정해 비교해 나감으로써 점 데이터 제거 여부를 결정할 수 있다. 이러한 과정을 반복해 수행되며 매우 복잡한 형상이 있는 부분에서는 최소 간격을 설정해 단면 데이터를 얻을 수 있다. 이러한 절차로 점 데이터 제거 공정이 수행되며 이 과정을 거치면 RP 파트 제작 시 필요한 가장 최적한 최종 단면 윤곽 데이터를 얻을 수 있다.

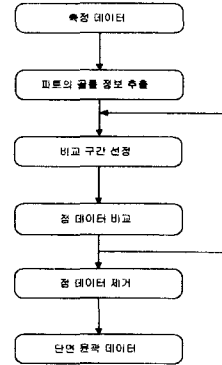


Fig. 3 Data Reduction Procedure

### 2.2.1 파트의 곡률 정보 추출

측정 점 데이터를 제거하기 위해 먼저 파트 전체 형상에 대한 곡률 정보를 얻어 이를 이용한다면 보다 효과적이고 파트의 정확성을 유지하는데 기여할 수 있다. 3차원 파트를 RP로 제작하기 위해서는 파트를 슬라이스하여 적층하게 된다. 따라서, 적층하는 방향을 Z축 방향이라고 하면 파트의 점 데이터 처리를 위해 Z축 방향의 곡률정보만을 고려하면 된다. 즉, Fig. 4에서 XY평면과 평행한 단면 윤곽선에 따라 직접 슬라이스 데이터가 생성된다면 u방향의 곡률정보는 RP 파트 제작 시 유지되게 된다. 하지만 Z축 방향 즉, v방향의 곡률은 RP 파트 제작 시 적층되어지는 방향과 일치하므로 이 방향에 대한 곡률은 RP 파트 제작에 필요한 간격으로 단면화되어 근사된다. 따라서 RP 파트 제작시 Z축에 대해 최소한 유지가 가능한 형상을 놓치지 않기 위해 Z축에 대한 전체적인 곡률정보가 필요하다. 또한 미리 제작하고자 하는 측정 점 데이터의 Z축 방향(v방향)에 대한 곡률정보를 얻게 되면 미리 생성되어야 할 단면 높이를 결정할 수 있는 등 작업의 정확도와 효율성을 증대시킬 수 있다.

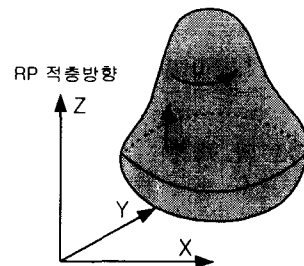


Fig. 4 Curvature Direction of a RP Part

(1) XY평면과 수직인 Z방향의 수직 단면 데이터 생성

Z방향의 곡률 정보를 추출하기 위해 다음과 같은 절차를 수행 할 수 있다. 먼저 Z방향과 평행한 즉, XY평면과 수직인 면으로 수직 단면 데이터를 얻을 수 있다. 이러한 수직 단면 데이터는 수직면과 측정하고자 하는 면 사이의 각이 90°에 가까울수록 보다 정확히 얻어질 수 있으므로 적용하고자 하는 파트의 법선 벡터(normal vector)를 고려하여 생성되어야 한다. 그 예로 다음 그림 5와 같이 크게 3가지 방법으로 수직 단면 데이터가 얻어질 수 있다. Fig. 5는 Z축에서 내려본 XY평면도에서의 수직 단면 데이터 생성을 위한 단면화 방향을 보여주고 있다. Fig. 5(a)의 경우 X축에 평행하게 일정간격으로 수직 단면화하여 수직 단면 데이터가 얻어지고 Fig. 5(b)는 Y축에 평행하게 단면화하여 얻을 수 있다. Fig. 5(c)는 중심축에서 일정한 각으로 회전하면서 수직 단면화 한다. 이러한 수직 단면화 방향은 파트의 전체적인 형상에 따라 결정되어야 하며 수직 단면화 방향에 따라 다음 절에서 설명할 방법으로 추출되는 결과 데이터가 조금씩 달라질 수 있다. 하지만 이 정보는 단지 데이터 감소과정을 보다 효율적으로 하기 위해 전체적인 비교구간을 나누는데 사용될 뿐이고 실제 데이터 감소 공정은 그 후에 수행하게 된다.

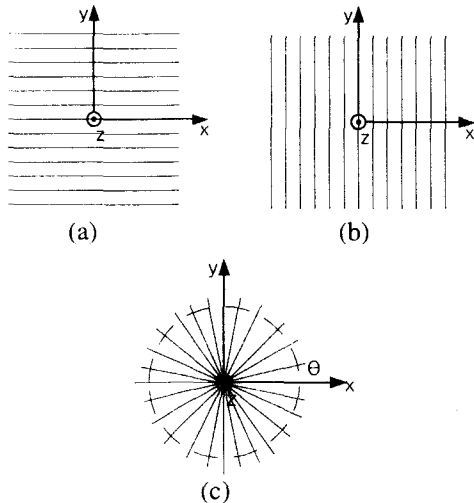


Fig. 5 Normal Cross-section

(2) 각각의 수직 단면화 데이터 내의 곡률 표현에 필요한 점들의 추출

위의 과정에서 수직 단면화된 데이터는 단면

화하기 위한 평면에 투영된 2차원의 점 데이터로 구성되어 있다. 이렇게 구성된 2차원의 점 데이터 내에서 다음 Fig. 6과 같이 서로 이웃하는 점들이 존재 할 때 각 두점간의 방향 벡터 A,B를 계산할 수 있고, 벡터 A와 벡터 B 사이의 각  $\theta$ 는 다음과 같이 식으로 계산 될 수 있다.

$$A = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$$

$$B = (x_3 - x_2, y_3 - y_2)$$

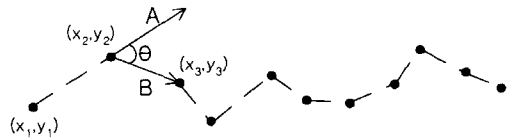


Fig. 6 Curvature Calculation of Normal Cross-sectional Data

$$\theta = \arccos\left(\frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|}\right) \quad (2.1)$$

따라서 연속 되어 지는 3개 이상의 점들간에 각 점들의 변화하는 정도를 각  $\theta$ 로 표현 할 수 있고, 이 각  $\theta$ 는 점들의 곡률 변화정도를 나타낸다. 곡률이 작은 경우일수록 그 값이 작아 지고, 점들간의 곡률이 커지면 그 값이 커진다. 따라서 이  $\theta$ 는 점들간의 곡률정보를 나타낸다고 할 수 있으며 점들간에 이루어지는 벡터의 변화를 나타내는 각  $\theta$ 를 기준으로 하여 곡률이 변화되는 점들을 추출 할 수 있다. 점들 간 이웃관계는 점 데이터 ordering을 재수행하므로 설정될 수 있는데 Z축 높이가 가장 낮은 점 하나를 선택한 후 가장 근접한 점을 다음 점으로 선택하는 작업을 계속함으로써 연속된 점 순서(order)가 정해진다. 본 연구에서는 이러한 방법으로 점을 추출하는 방법을 angular deviation method라 하고 Fig. 7은 추출되는 점들을 보여 주고 있다.

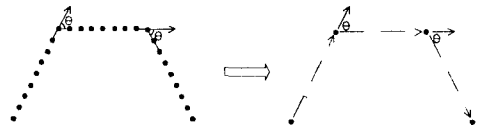


Fig. 7 Angular Deviation Method

(3) 각 수직 단면에서 추출된 점들로 구성된 3차원 모델

앞의 방법에서 각 수직 단면화 데이터내의 2차원 점을 추출 한 후 이를 다시 3차원 모델로 구

성을 하면 각각의 수직 단면화 데이터로부터 곡률 정보에 근거하여 추출된 점들로 구성된 하나의 점 데이터 모델로 완성된다. 이렇게 추출된 점 데이터는 전체 파트 형상의 곡률 정보를 나타내는 점들이라 할 수 있으며 본 연구에서는 이러한 데이터를 곡률 정보 데이터라 하였다. 이 곡률 정보 데이터로부터 곡률 정보 그래프를 그릴 수 있고 이러한 것들을 통해 비교하고자 하는 subregion을 선택할 수 있다. 다음 Fig. 8은 Fig. 8(a)로부터 수직 단면에서 추출된 점을 하나로 모아 놓은 Fig. 8(b)의 곡률 정보 데이터를 보여 주고 있다. 측정 파트에 모서리(edge)가 존재하는 경우 곡률 정보 데이터에서 그 부분에 해당하는 점 데이터는 남아 있게 되고 기타 다른 곡률변화가 있는 부분에 대한 점들도 역시 남게 된다. 따라서 이러한 곡률 정보 데이터는 측정 파트의 모서리 및 곡률이 변화하는 부분을 쉽게 찾는 데 이용될 수 있다.

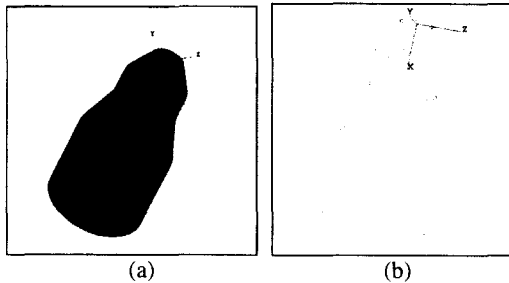


Fig. 8 Edge Extraction from Scanned Data

(4) 곡률 정보 그래프

앞에서 설명한 곡률 정보 데이터로부터 곡률의 변화 정도와 높이를 쉽게 알기 위해 곡률 정보 그래프를 그릴 수 있다. 수직 단면화 데이터의 Z 축 높이에 따른 점들의 개수와 수직 단면 데이터로부터 angular deviation method를 적용한 후의 곡률 정보 데이터의 파트의 각  $Z_i$  높이에서의 점들의 개수 비율을  $r_{z_i}$  라 하면 곡률정보 그래프는 파트의  $Z_i$  높이와 각 높이에 해당하는  $r_{z_i}$  값으로 그려질 수 있다.  $r_{z_i}$  값은 다음 식(2.2)와 같이 계산되어 질 수 있다. 여기서  $Z_i$ 는 RP제조 공정시 적용되는 일정한 간격과 일치하게 설정될 수 있다.

$$r_{z_i} = \frac{(\text{곡률정보데이터의점 개수})_{z_i}}{(\text{수직단면화데이터의점 개수})_{z_i}} \quad (0 \leq r_{z_i} \leq 1) \quad (2.2)$$

다음 Fig. 9는 곡률 정보 그래프 예를 보여 주

고 있다.

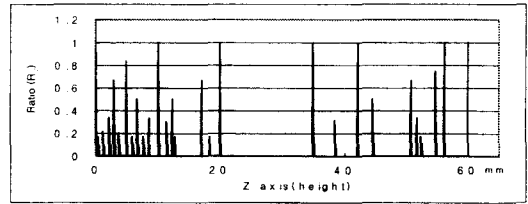


Fig. 9 Example of Curvature Information Graph

위 곡률정보 그래프를 살펴보면 측정 파트의 모서리와 같은 곡률 변화가 심한 부분에 해당하는  $Z_i$ 에서  $r_{z_i}$  값이 크게 되고 곡률변화가 없는 부분일수록  $r_{z_i}$  값이 작게 된다. 또한 곡률 변화가 많은 부분에 그래프 형상이 복잡하게 된다. 이  $r_{z_i}$  값의 범위는 0보다 크고 1보다 작은 값으로 이루어진다. 위 Fig. 8에 대한 곡률 정보 그래프는 Fig. 10과 같이 나타내질 수 있다.

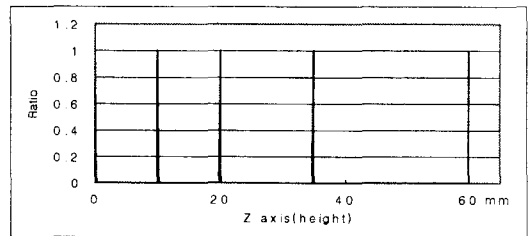


Fig. 10 Curvature Information Graph of Fig. 8

2.2.2 Subregion 나누기

앞에서 설명된 곡률 정보 데이터와 그래프를 통해 측정 점 데이터 내부의 곡률 변화가 큰 부분을 선택함으로써 subregion을 크게 나눌 수 있다. 이렇게 subregion이 나누어지면 subregion내 존재하는 선형성을 각각 비교하게 된다. 곡률 정보 그래프에서 우선  $r_{z_i}$  값이 클수록 subregion 나누기의 기준이 될 수 있다. 이러한 subregion 나누기를 수행하여 비교하면 먼저 파트의 모서리와 같은 주요 형상을 놓치지 않을 수 있고 전체 파트를 크게 나누어 한번에 비교하게 되므로 수행속도도 빠르게 된다. 선형성 비교 방법은 다음절에 자세히 설명하였다.

2.2.3 Homotopy를 이용한 점 데이터 비교

본 연구에서 파트내의 단면간에 선형성을 유

지하는 부분을 추출하여 이러한 부분에 대한 데이터를 제거하기 위해 homotopy 방법을 사용하였다.

**Homotopy**

Homotopy란 Fig. 11에서 보는 바와 같이 3차원 공간상에 서로 평행한 두 곡선  $f(x)$ ,  $g(x)$ 가 존재할 때 이 두 곡선의 형상에 따른 내부 곡선을 매개변수 식  $F(x, t)(0 \leq t \leq 1)$ 로 정의하여 생성시킬 수 있으며 이때  $F(x, t)$ 를 곡선  $f(x)$ 에서부터 곡선  $g(x)$ 까지의 homotopy라고 정의한다.<sup>(5)</sup> 함수  $F$ 가  $F(x, t) = (1-t)f(x) + tg(x)$ 에 의해 정의되어질 때 이를 직선(straight-line) homotopy라고 한다.

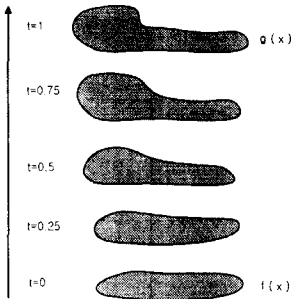


Fig. 11 Homotopy

다음 Fig. 12 (a),(b)는 실제로 homotopy 방법을 이용하여 단면 윤곽 곡선을 생성한 예를 보여주고 있다.

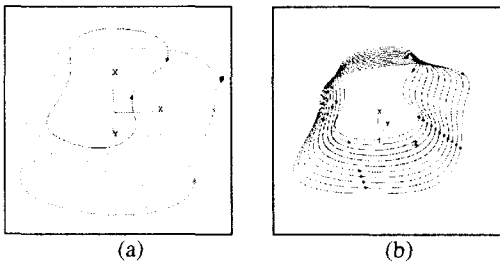


Fig. 12 Generation of Intermediate Contours

**점 데이터의 비교**

앞에서 먼저 큰 간격으로 나누어진 subregion에서 추출된 양끝 단면 데이터로부터 B-spline 곡선을 생성한 후 이를 기준으로 homotopy 방법을 이용해 RP 파트 제작에 사용되는 두께(예: 0.1mm)에 근거하여 작은 간격으로 단면 윤곽곡선을 생성하고 그 단면 윤곽곡선에 해당하는 단면 점 데이터를

를 추출하여 점 데이터와 단면 윤곽선 간을 비교하여 데이터 제거 여부를 결정할 수 있다.

단면 윤곽선과 점과의 거리는 다음과 같은 식들에 의해 결정될 수 있다. Fig 13에서 보여지듯이 첫 번째 기준 단면에서 생성된 곡선을  $C(t)$ 라 하고 비교하고자 하는 점을  $P$ 라 할 때 곡선과 점간의 거리는 다음 식(2.3)으로 표현 될 수 있다.

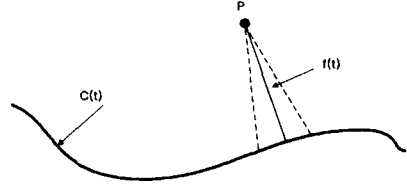


Fig. 13 Calculation of the Distance Between a Point and a Curve

$$f(t) = P - C(t) \tag{2.3}$$

점과 곡선간의 거리란 최소 거리를 의미하므로 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$\min(|f(t)|) = \min(\sqrt{f(t) \cdot f(t)}) \tag{2.4}$$

즉, 식(2.4)에서  $|f(t)|$ 가 최소값을 갖기 위해서는 다음 조건이 성립되어야 한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(f(t) \cdot f(t)) = 2 \frac{\partial f(t)}{\partial t} \cdot f(t) = 0 \tag{2.5}$$

식(2.5)를 정리하여 풀어보면 다음과 같은 식을 유도해 낼 수 있다.

$$\frac{C(t)}{\partial t} \cdot (P - C(t)) = 0 \tag{2.6}$$

따라서 식(2.6)을 만족시키는 곡선  $C(t)$ 의 점은 점  $P$ 와 최소거리를 갖게 된다. 이 관계를 다시 해석하여 보면 한 점과 곡선 상의 점까지의 벡터와 그 점에서 곡선의 법선 벡터가 직교함을 의미한다.

기준 곡선과 다음 층의 단면 데이터에 존재하는 점 데이터간의 거리를 계산한 후 종합하여 동일하지 여부를 판별하기 위해 최종적으로 최대 허용 거리(Maximum allowable distance)와 평균 거리(Average distance)를 계산하여 기준 값으로 비교할 수 있다. 만약 이 값들이 일정한 공차 범위 안에 들어올 경우 서로 형상이 같은 단면을 가지게 되기 때문에 subregion 내의 모든 점 데이터 제거가 가능하게 되고 공차를 만족하지 않는 경우는 처음 subregion을 다시 더 작게 나누어 비교 절차를 반복 수행한다. 이때 다시 작게 나누어지는 subregion은 처음 subregion 내의 데이터 비교 과정 중

평균거리가 가장 큰 곳에 해당하는 Z<sub>i</sub>에서 다시 나누어 질 수 있다. 이러한 점 데이터 제거가 이루어지지 않을 경우 이러한 절차를 최소 허용 간격까지 반복적으로 수행함으로써 측정 데이터를 제거하고 RP제작에 필요한 단면 데이터를 추출할 수 있다. 마지막까지 세부적으로 나누어진 subregion 데이터가 결국 측정 점 데이터의 최종 데이터가 된다.

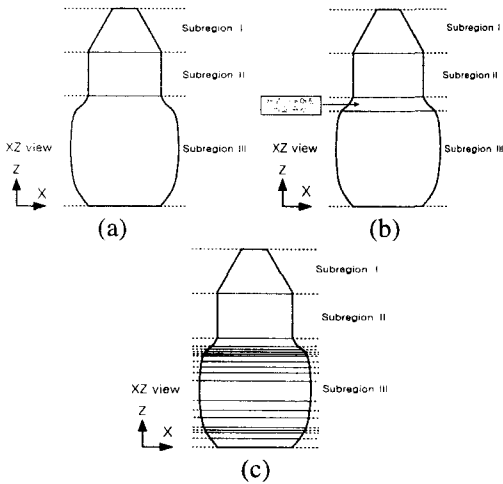


Fig. 14 Data Comparison using Subregions

Fig. 14(a)는 subregion을 크게 나누는 데이터를 보여주고 있다. subregion I과 subregion II에 존재하는 내부 데이터는 subregion I, II의 양 끝 단면 데이터로부터 생성된 단면 윤곽 곡선과 선형성이 유지되므로 subregion 양 끝 단면 윤곽선을 제외하고 내부 데이터는 모두 제거 될 수 있다. 하지만 subregion III에서와 같이 단면 간의 선형성 비교시 공차 범위에 들지 않은 경우 평균 거리값이 최대가 되는 높이에서 Fig. 14(b)와 같이 다시 subregion이 나누어 진다. Fig. 14(C)는 이러한 과정의 반복 수행 후 최종적으로 얻을 수 있는 단면 데이터를 보여준다.

2.3 슬라이스 데이터 생성

일반적인 RP 장비의 경우 외부에서 STL 파일을 표준 입력 파일로 받아서 이 STL 파일로부터 다시 슬라이스 데이터를 생성하여 작업을 하게 된다. 본 연구에서는 STL 파일을 사용하지 않고 앞에서 생성된 윤곽 곡선 데이터로부터 직접 슬라이

스 데이터를 생성하였다. 이 공정은 앞서의 단면 제거 공정과는 별개의 독립적인 과정으로 입력된 단면간의 거리에 관계없이 homotopy 방법을 이용하여 다시 빠르게 RP공정에 맞는 간격으로 슬라이스 파일을 생성한다. Table 2는 슬라이스 데이터 구조를 보여주고 있는데 이는 CAD 모델로부터 RP 장비의 적층 높이로 구성되는 단면 데이터와 각 층에 포함되어 있는 외형 윤곽선(contour curve)으로부터 내부를 녹이기 위한 레이저 경로 데이터로 구성되어지며 RP 장비에 기존의 STL 파일 사용없이 직접 적용이 가능하다.

Table 2 Example of Slice Data

Format of slice file ( binary )	p1_s3.fill(slice file)	build packet
Part number(4 byte integer)	1	part list :
Slice number(4 byte nteger)	3	p1
Pattern type(4 byte integer)	1	p2
(0-outline, 1-fill)	6	3
number of vectors commands (unsigned 4 byte integer)	-0.15, 0.15, 1	(layer file)
x, y coordinate, vector type	0.15, 0.15, 0	0.3000000
x, y coordinate, vector type	-0.20, 0.00, 1	p1_s3.fill
(vectortype:0-draw,1-jump)	0.20, 0.00, 0	p2_s3.fill
(vector type: 4 byte integer)	-0.15, -0.15, 1	end-of-layer
	0.15, -0.15, 0	

슬라이스 데이터 생성법은 크게 균일한 두께로 단면화하는 direct 단면화 방법과 파트의 정밀도를 고려하여 파트의 곡률에 따라 단면 두께를 변화시키며 단면화 작업을 하는 adaptive 단면화 방법을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 균일한 두께를 가진 direct 단면화 방법을 이용하였다.

2.4 RP 파트 제작

지금까지 앞에서 제시한 절차 공정에 따라 측정 데이터로부터 생성된 슬라이스 데이터(slice data)를 STL 파일을 사용하지 않고 직접 RP 장비에 입력 함으로써 실제 파트를 제작할 수 있다. 본 연구에서는 SLS(Selective Laser Sintering)기술을 이용한 미국 DTM사의 Sinterstation 2000 장비를 사용하여 실제 파트를 제작하였다.

3. 적용 예

본 장에서는 위에서 제시한 방법을 예제 모델에 적용하여 실제 3차원 측정 데이터로부터 바로 RP 파트로 제작되는 예를 보이고 데이터 감소에 따른 효율성을 검사하였다. 실제 파트의 측정은



미국 LDI사의 Surveyor 1200시스템을 사용하였고 데이터 감축공정은 SGI Indigo2 workstation에서 Surfacer 7.1의 Open Architecture와 C/C++을 사용하여 프로그램하였다. 슬라이스 데이터 생성은 개방형 솔리드 모델링 커널인 ACIS 2.1을 사용하였고 RP제작은 미국 DTM 사의 SLS방식인 Sinterstation 2000 RP장비를 사용하여 파트를 제작 하였다.

**병 형상에 적용한 예**

다음 Fig. 15(a)와 (b)는 각각 측정 점 데이터와 이것을 일정한 각으로 수직 단면화한 데이터를 보여주고 있다. 이렇게 생성된 수직 단면 데이터로부터 angular deviation method를 적용하여 Z축 방향의 주요 정보를 추출한 결과 Fig. 16과 같은 곡률 정보 데이터를 얻을 수 있다. 이 점들은 원래 형상에 대해 Z축 방향(RP제작 방향)으로 곡률이 변화하는 정보를 전체적으로 대표한다 할 수 있다. 이렇게 얻어진 결과에 대한 곡률 정보 그래프는 Fig. 17과 같이 그려질 수 있다.

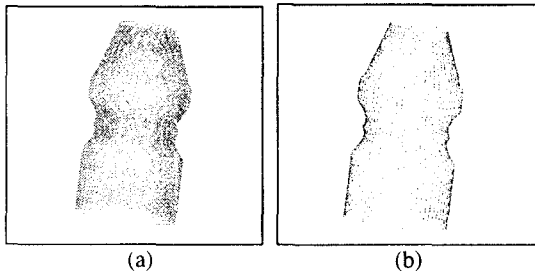


Fig. 15 Scanned Data(a) and Normal Cross-sectional Data(b)

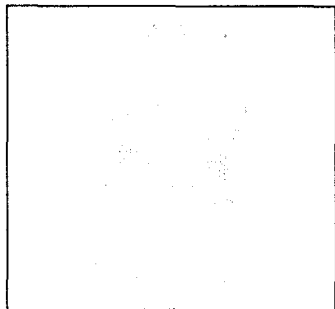


Fig. 16 Result of Angular Deviation Method

이러한 그래프로부터 파트의 수직 방향(Z축 방향)에 대한 곡률 정보를 한눈에 알 수 있고 이 정보를 이용하여 subregion이 나누어져야 할 Z좌표를 쉽게 구할 수 있다. 여기서는 RP 파트 제작 시 주

로 사용되는 한 슬라이스 두께인 0.1mm 간격으로 곡률 정보 그래프를 나타내었으며 이렇게 구해진 곡률 정보 그래프에서  $r_{zi}$  값이 0.1(10%) 이상 되는  $Z_i$ 에서 subregion을 나눈 결과 다음 그림 18과 같이 subregion을 나눌 수 있다.

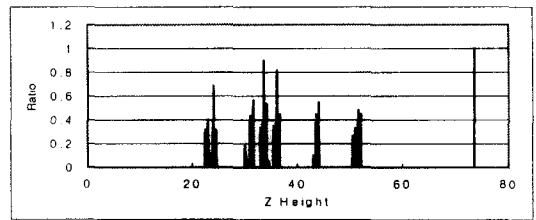


Fig. 17 Curvature Information Graph of a Bottle

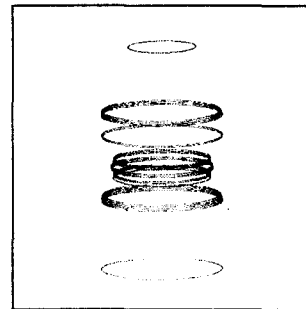


Fig. 18 Subregions

다음 과정으로 앞에서 설명한 점 데이터 제거 방법으로 반복적으로 각 subregion 내부의 점 데이터와 subregion 경계 데이터를 homotopy방법을 이용해 공차 최대 허용 거리 0.3mm, 평균 거리 0.05mm로 비교한 결과 Fig. 19와 같이 RP제작에 필요한 단면들로 구성된 최종 데이터를 얻을 수 있었다.

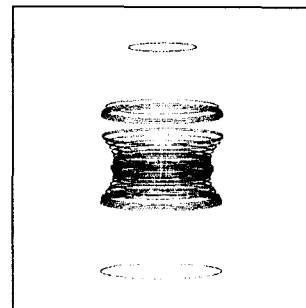


Fig. 19 Reduced Data

위 결과 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

**Result :**

The initial num. of point data : 44064  
 The num. of points in the reduced data set : 9271  
 ( The num. of cross-sections: 31)  
 The num. of reduced data points : 34793  
 Reduction ratio : 78.96 %

RP제작을 위하여 이렇게 얻어진 최종 데이터를 입력으로 하여 슬라이스 데이터를 직접 제작한 결과 다음 Fig. 20과 같은 RP 파트를 제작하였다.

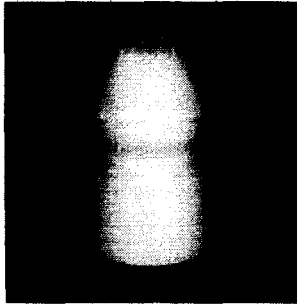


Fig. 20. RP Part Fabrication

본 연구에서 사용된 방법과 기존의 STL 파일을 사용하여 직접 RP 파트를 제작하는 방법을 비교해 보면, 여기서 제시한 방법은 RP 장비에 적용하기 위한 슬라이스 데이터 생성을 위해 비교 공정을 통해 감소된 데이터만 저장하고 있으면 되지만 기존의 방법은 점 데이터로부터 형상 정보 손실 없이 직접 STL 파일을 만들기 위해서는 매우 조밀한 점들이 모두 유지 되어야만 한다. 따라서 본 연구에서 개발된 방법으로 파트 제작하더라도 정밀도가 STL 파일을 사용할 때와 같은 수준이라면 파일 크기 면에서 본 방법이 매우 유용하다 할 수 있다. 다음 Table 3은 처음 측정 데이터와 점 데이터로부터 Delaunay Triangulation방법<sup>(2)</sup>으로 직접 STL 파일을 생성한 데이터의 파일 크기를 비교한 결과를 보여주고 있고 Fig. 21은 점 데이터로부터 직접 생성된 STL mesh 데이터를 보여주고 있다.

Table 3 File sizes for the bottle shape model

	File sizes (kilobytes)	
	ASCII format	Binary format
Original data	1,336.424	530.684
STL mesh data	5,389.162	1,485.884
Reduced data	274.288	113,166

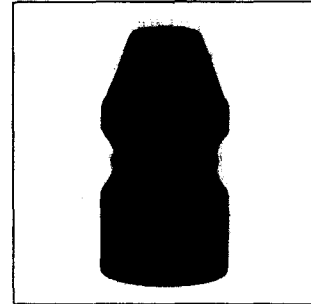


Fig. 21 STL Mesh Data

초기 점 데이터와 감소된 데이터의 크기는 Surfacar 7.1에서 지원되는 binary 형식과 ASCII 형식으로 저장되었고 STL 파일도 binary와 ASCII 형식으로 저장해 각각을 비교하였다. 비교결과 감소된 데이터가 초기데이터와 STL데이터에 비해 파일 크기가 매우 작아졌음을 알 수 있다. 다음 이 데이터에 대해 정밀도를 검사하기 위하여 감소된 파일과 STL 파일로부터 일정간격의 10개 중간 단면 데이터를 생성한 후 같은 높이에서의 정확한 CAD데이터와 비교하였다. 그 결과를 Fig. 22, Fig. 23의 그래프로 보기 쉽게 정리하였다.

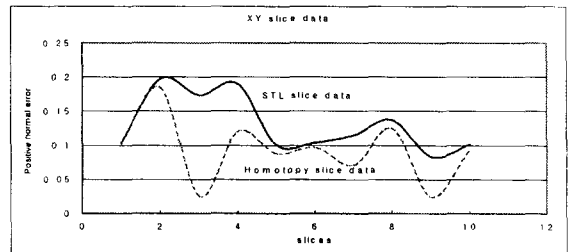


Fig. 22 Maximum Positive Normal Error

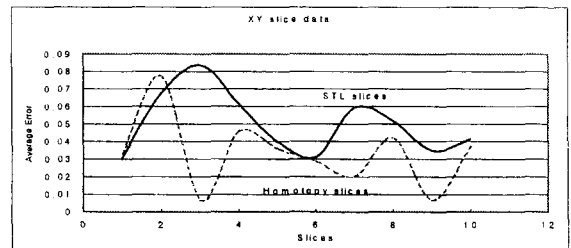


Fig. 23 Average Error

Fig. 22는 CAD데이터로부터 추출된 점과 감소된 데이터와 STL 파일에서 각각 생성된 중간 단면 곡선과의 최대 거리(Maximum positive error)를

비교한 결과로 Fig. 23은 평균 거리(Average error)를 비교한 결과이다. 이 결과를 보면 본 연구에서 사용된 감소된 데이터로부터 homotopy 방법으로 생성된 단면이 점 데이터에서 직접 생성된 STL 데이터의 단면보다 최대 error는 비슷하나 오히려 error가 작은 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 제시된 방법이 적은 데이터량으로 오히려 높은 정밀도를 가짐을 알 수 있다.

**Stem에 적용한 예**

다음 보다 freeform한 형상의 인공 고관절의 stem에 적용해 보았다. Fig. 24는 초기 측정 점 데이터를 보여주고 있다.

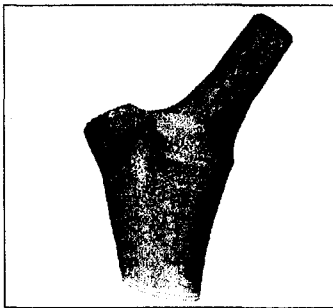


Fig. 24 Original Scanned Data of a Stem

이렇게 얻어진 데이터를 수직 단면화하여 Angular deviation method를 적용한 결과 Fig. 25와 같은 곡률 정보 데이터를 얻었으며 이로부터 구한 곡률 정보 그래프는 Fig. 26과 같이 얻을 수 있다.

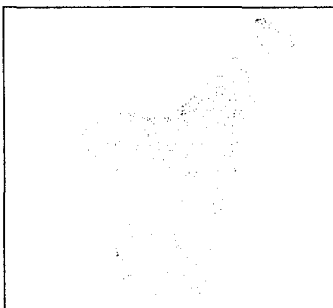


Fig. 25 Curvature Information Data

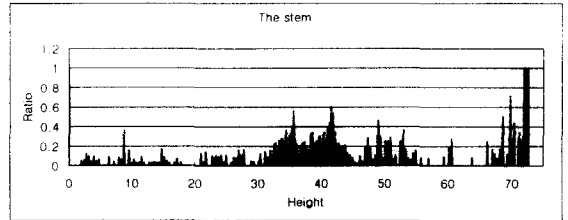


Fig. 26 Curvature Information Graph

이렇게 얻어진 그래프를 이용하여 0.1 (10%)이상의  $r_{zi}$  값에 해당하는 높이에서 subregion를 Fig. 27과 같이 나눌 수 있다.

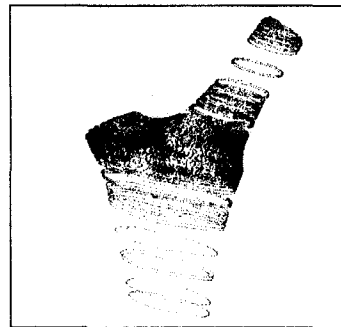


Fig. 27 Subregions

이렇게 subregion을 나눈 후에 앞에서 설명한 절차대로 그 중간 데이터들을 역시 비교하고 다시 subregion을 나누어 비교하는 과정을 반복하여 데이터 감소를 한 결과 Fig. 28과 같은 최종 감소된 데이터를 얻을 수 있었다.

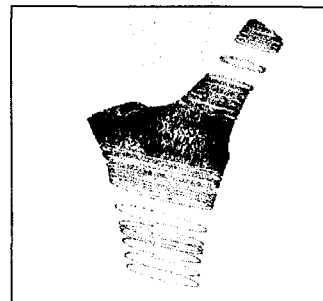


Fig. 28 Final Reduced Data Set

감소된 결과를 요약하면 다음과 같고 이 데이터를 이용하여 슬라이스 데이터를 생성해 RP 파트를 제작한 결과 Fig. 29와 같은 파트를 얻을 수

있다.

**Result :**

The initial num. of point data: 22524  
 The num. of points in the reduced data set : 10148  
 ( The num. of cross-sections 105)  
 The num. of reduced data points: 12376  
**Reduction ratio : 54.95 %**

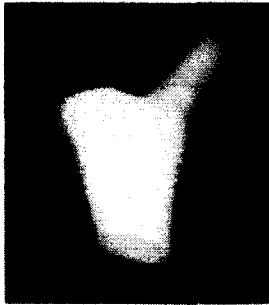


Fig. 29 RP Part Fabrication

Fig. 30은 점 데이터로부터 직접 생성된 STL mesh 데이터를 보여주고 있고 측정데이터로부터 직접 생성한 STL 파일과 감소된 데이터의 파일 크기를 비교한 결과는 Table 4에 정리하였다.

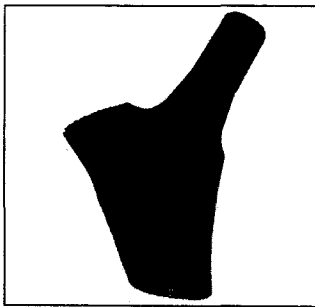


Fig. 30 STL Mesh Data

Table 4 File sizes for the stem

	File sizes (kilobytes)	
	ASCII format	Binary format
Original data	1,395.352	517.037
STL mesh data	7,651.652	2,131.584
Reduced data	301.748	123.690

앞의 병 형상의 모델에 대해서는 직접 단면들을 비교하여 제거된 데이터를 사용하더라도 정밀

도가 유지됨을 보였으나 이 Stem 형상에 대한 예는 실제 정확한 CAD모델이 존재하지 않아 정밀도에 관한 비교는 하지 않았다. 하지만 이것 역시 병 형상에 적용한 같은 방법으로 데이터 감소를 하였으므로 정밀도가 유지되고 있다고 생각할 수 있다.

**4. 결 론**

본 연구에서는 Reverse Engineering(RE) 기술에서 얻은 측정 점 데이터를 Rapid Prototyping(RP) 기술에 직접 응용하는 방법에 관해 새로운 공정 절차를 제시하였다. 지금까지는 주로 점 데이터로부터 CAD 시스템을 이용하여 곡면 모델을 생성하고, STL 파일로 변환 시킨 후, 슬라이싱 작업을 거쳐 RP 공정에 적용되어 왔으나 이러한 전체 공정을 모두 수행할 경우 시간과 작업자의 노동력이 많이 소요되고 광대한 데이터량, STL 파일의 부정확성 등 많은 문제점이 발생하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 RP 장비의 기준 입력 파일인 STL 파일을 이용하지 않고 점 데이터로부터 곧바로 RP 기술에 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 RP 파트 제작을 위한 곡률 정보 데이터 및 그래프를 이용한 subregion을 나누는 방법 및 homotopy 방법을 이용한 데이터 제거 방법을 제시하고 구현하였다. 이렇게 감소된 데이터로부터 다시 homotopy를 이용하여 빠르게 슬라이스 데이터를 생성하여 실제 RP 파트를 제작하였다. 그리고 감소된 데이터는 기존의 점 데이터로부터 STL을 생성한 데이터에 비해 작은 량으로 더 좋은 정밀도를 유지하고 있음을 보였다. 본 논문에서 제시된 방법으로 작업을 수행하게 될 경우 RE에서 얻어진 점 데이터를 이용하여 보다 신속하고 정확하게 RP 파트 제작이 가능하게 되고 기존의 STL 파일의 문제점을 극복할 수 있다.

**참고문헌**

1. Chen, Y. H., and Ng, C. T., "Integrated Reverse Engineering and Rapid Prototyping," Proceedings of 20th International Conference on Computers & Industrial Engineering (ICC & IE '96), Vol. 1, pp. 433-436, 1996.
2. Fang, Tsung-Pao and Piegl, L. A., "Delaunay Triangulation in Three Dimensions," IEEE

- Computer Graphics and Applications, Vol. 15, pp. 62-69, 1995.
3. Hosni, Y., Ferreira, L., and Burjanroppa, R., "Rapid Prototyping through Reverse Engineering," *2nd Industrial Engineering Research Conference Proceedings*, pp. 420-424, 1991.
  4. Jamieson, R., and Hacker H., "Direct Slicing of CAD Models for Rapid Prototyping," *International Conference*, 1995.
  5. Kunii, T. L., Shinagama, Y., and Gotoda, H., *Intelligent Design and Manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc., 1992.
  6. Ma, W., Swaelens, B., and Vancrean, W., "Surface Modeling from CT-Images," *International Conference on Manufacturing Automation (ICMA '97)*, pp. 1021-1026, 1996.
  7. Qiming, H., and Yungan, W., "Direct Slicing for Rapid Prototyping," *International Conference on Manufacturing Automation (ICMA '97)*, Vol. 1, April 28-30, 1997.
  8. Schoene, C., and Hoffmann, J., "Reverse Engineering Based on Multi-axis Digitized Data," *International Conference on Manufacturing Automation (ICMA '97)*, Vol. 1, pp. 909-914, April 28-30, Hong Kong 1997.
  9. Vail, N. K., Wilke, W., Bieder, H., and Juneman, G., "Interfacing Reverse Engineering Data to Rapid Prototyping," *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 481-490, 1996.
  10. Vradny, T., Martin, R. R., and Cox, J., "Reverse Engineering of Geometric Models - An introduction," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.