

블룸분해를 이용한 절삭가공부품 솔리드 모델의 단순화

우 윤 환*

Decomposition-Based Simplification of Machined Part in Solid Model

Yoonhwan Woo*

ABSTRACT

As 3D solid modeling has been widely used in designing products, solid models of the products are directly used in various applications such as engineering analysis and process planning. However, the fully-detailed solid models may not be necessary in some applications. For example, it is often more efficient to use simplified model of part for engineering analysis. Generation of mesh for the complex original model requires a quite amount of time, and the consequence of finite element analysis may not be desirable due to small and detailed geometry in the model. In this paper, a method to simplify solid models of machined parts is presented. This method decomposes the delta volume of machined part, and uses the decomposed volumes to simplify the solid model. Since this method directly recognizes the features to be removed from the final model, it is independent of not only design features of specific CAD system, but also designer's design practice or design sequences.

Key words : Model simplification, Geometric modeling, Volume decomposition, Level of Detail, Solid modeling

1. 서 론

3차원 CAD시스템이 널리 보급되면서 다양한 분야에서 솔리드 모델을 이용한 설계 작업이 보편화 되고 있다. 솔리드 모델은 그 특성상 형상 정보 외에 위상 정보 등 다양한 정보를 포함하고 있으며, 이러한 정보들을 이용하여 부품의 역학적 해석, 제품의 생산 공정 계획, CNC등을 이용한 CAM과의 통합 등 많은 분야에 널리 응용되고 있다.

해석 분야의 경우 CAD 시스템에서 생성된 기계 부품의 솔리드 모델을 직접 이용하여 해석에 필요한 3차원 메쉬를 생성하여 유한요소법과 같은 해석 프로그램을 사용한다. 그러나, 설계단계에서 구현된 부품의 솔리드 모델이 해석을 포함한 이후의 여러 응용분야에 사용될 때는 지나치게 상세한 형상 모델보다는 단순화 되거나 축약된 모델이 더 바람직하고 유용한 경우가 많이 있다^[1]. 대부분의 경우 복잡한 형상이나

작은 형상은 유한요소 생성단계에서 적절한 메쉬를 생성하지 못하거나 너무 많은 작은 메쉬를 만들어 해석에 좋지 않은 결과를 초래할 수 있기 때문에 이러한 상세한 형상들을 제거하여 모델을 단순화한 후 그 모델을 이용하여 메쉬를 생성하는 것이 바람직하다^[2]. 또한 설계단계에서 새로운 부품을 디자인할 때, 이미 구현된 많은 솔리드 모델들을 검색하여 그 중에서 유사한 모델을 선택하고, 이를 이용함으로써 처음부터 해당부품의 솔리드 모델을 생성하는 것보다 설계 및 제작공정에 소요되는 시간을 단축하고 효율성을 높일 수 있다. 이와 같이 모델간의 유사성 판단을 위해서는 각 부품의 지배적인 특징형상들을 먼저 비교한 후 상세한 수준의 특징형상들을 비교하는 것이 유사성 판단의 성공면에서나 효율면에서 훨씬 바람직하다고 할 수 있다^[3].

이와 같이, 응용분야에 따라 기계부품의 솔리드 모델을 일정 수준 단순화할 필요가 있으며, 주어진 수준에 따라 특정한 형상을 제거함으로써 효율적인 작업을 지원할 수 있는 모델 단순화에 대한 필요가 증가하고 있다.

*교신저자, 정회원, 한성대학교 기계시스템공학과
- 논문투고일: 2006. 10. 17
- 심사완료일: 2007. 02. 20

이에 본 논문에서는 기존의 방법들에 대한 고찰을 통해 기존 방법들의 단점 및 한계를 보완하는 새로운 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 기계부품 솔리드 모델의 단순화, 특히 가장 대표적인 가공 방법인 절삭 가공에 의해 생산되는 부품의 솔리드 모델을 설계에 사용된 특징형상을 이용하지 않고, 모델의 최종 형상으로부터 불륨분해 방법을 이용하여 직접 감법특징형상(subtractive feature)을 인식하여 모델 단순화를 구현하였다.

2. 관련 연구의 고찰

솔리드 모델의 단순화에 관한 연구는 크게 두 종류로 구분할 수 있다. 첫 번째는 최종 최종형상으로부터 형상적인 유추(geometric reasoning)를 통해 제거할 형상을 인식하고 이를 제거하여 단순화하는 방법이다^[1-3]. 두 번째는 설계자가 모델생성에 사용한 설계특징형상(design feature)를 사용하여 단순화하는 방법이다^[1-3,9,10].

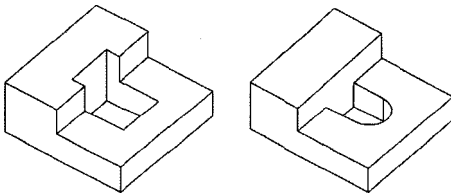


Fig. 1. Some parts that cannot be simplified by the smooth-out method.

Koo^[6]는 물건을 플라스틱 랩으로 감싸는 것에서 착안하여, 랩-어라운드(wrap-around)라는 방법을 제안했으며, 이와 더불어 오목한 변들을 루프로 갖는 작은 특징형상들을 제거하는 스무드아웃(smooth-out)이라는 방법을 제시하였다. 이 smooth-out 방법은 오목한 변들로 구성된 루프를 먼저 인식한 후 이로부터 각 사이드 면들을 찾고, 각 사이드 면들이 불록한 변으로 연결되는 윗변을 찾는 방법으로 제거하고자 하는 형상을 인식한 후 이들 면들을 제거하는 방법이다. 하지만 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 이 방법은 오목한 변들로 구성된 루프의 사이드 면들이 불록한 변으로 구성된 면을 가지지 않을 경우 적용이 불가능한 점이 있다.

특징형상 기반 캐드 시스템의 특징형상을 이용한 시도로서 이재열^[10]과 이상현^[11]은 설계 시 사용되는 특징형상을 중간 모델인 셀모델(cellular model)에 저

장하고 이를 이용하여 특징형상을 재배열하는 방법으로 해당 솔리드 모델을 단순화시키는 방법을 제안하였다. 이 두 방법은 모두 특징형상 기반 CAD시스템에서 모델링에 사용된 특징형상들을 모두 합한 셀 형태의 non-manifold 모델을 만들고 이 non-manifold 셀 모델로부터 각 단계에 적합한 특징형상을 재배열하여 단순화된 모델을 생성하는 방법을 채택하고 있다.

이러한 특징형상을 재배열하는 데 있어 이재열은 먼저 가법 특징형상(additive features)들의 합을 가장 단순화된 모델로 삼고, 이로부터 감법 특징형상들을 체적을 기준으로 내림차순으로 배열하는 방법으로 모델을 단순화하였다. 하지만 이 방법은 특정 모델이 가법 특징형상만으로 이루어 졌을 때는 단순화가 불가능하며, 가법 특징형상의 부피가 감법 특징형상의 부피보다 작은 경우에도 감법 특징형상이 우선한다는 단점이 있다^[1].

이에 반해 이상현^[11]은 특징형상의 유효볼륨(effective volume)이라는 개념을 도입하여 감법과 가법 특징형상의 구분에 상관없이 특징형상을 재배치할 수 있는 방법을 제안하였다. 특징형상의 유효볼륨이란 재배열된 특징형상 트리에서 각 특징형상의 원래 기본입체에 대해 실제로 사용될 부분 영역으로서 입의 상세수준 모델의 경계 계산을 할 때 불리안 작업의 대상으로 사용된다. 이 방법을 통하여 가법/감법 특징형상에 의존하지 않으며 특징형상의 생성 히스토리에 관계없이 특징형상을 재배치하여 원하는 수준의 모델 단순화를 구현하였다.

그러나 설계 시 사용된 특징형상, 즉 설계특징형상(design feature)을 기반으로 하는 이 두 방법은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 첫째, 제시된 두 방법 모두 특징형상 기반 모델링이 지원되는 환경에서만 가능하다는 점이다. STEP과 같이 설계 시 사용된 특징형상의 정보가 사라진 변환된 데이터의 모델에서는 적용이 불가능하다^[10]. 이와 더불어, 더욱 중요한 점은 설계 시 사용되는 특징형상이 사용자의 모델링 습관 및 방법에 따라 해당 모델의 단순화의 결과가 달라진다는 점이다.

예를 들어, Fig. 2(a)와 같은 부품을 모델링하는 경우, Fig. 2(b)에 보여진 것처럼 먼저 슬롯(slot) 특징형상을 생성하고, 그 다음 스텝(step) 특징형상을 생성하여 모델을 구현할 수 있다. 하지만, 같은 부품을 다른 설계자가 Fig. 2(c)처럼 먼저 스텝 특징형상을 생성하고, 나중에 슬롯 특징형상을 생성하여 모델을 구현하는 것도 가능하다. 특징형상의 체적을 단순화의 기준이라 했을 때 Fig. 2(d)와 (e)에서 볼 수 있듯이 어떤

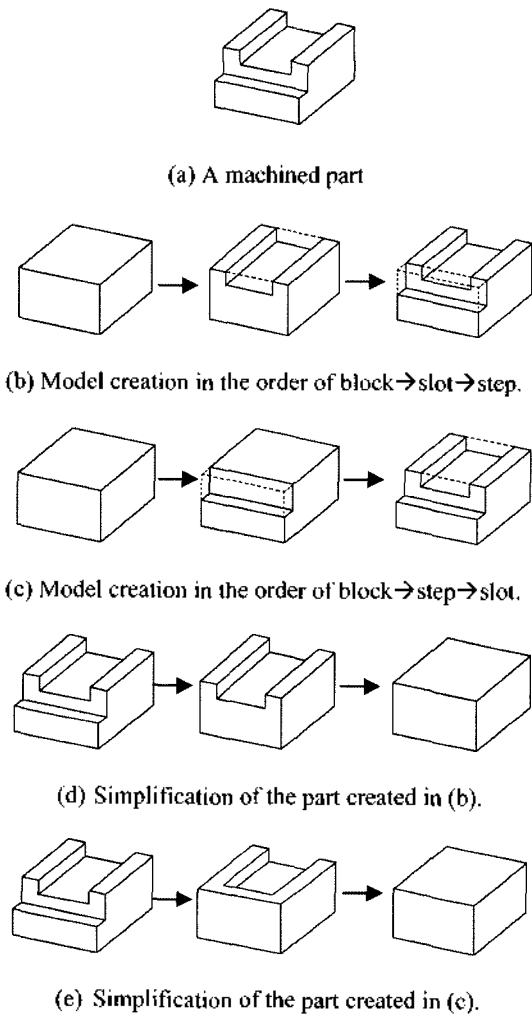


Fig. 2. Problem of design feature-based simplification.

방법으로 모델을 생성했느냐에 따라 단순화의 결과는 달라진다.

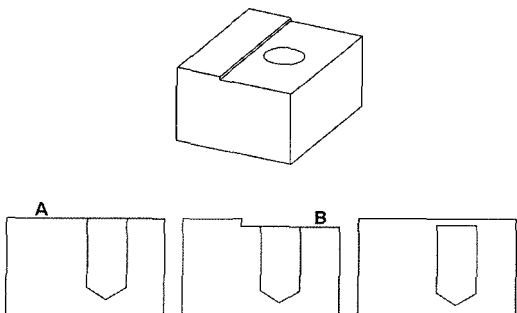


Fig. 3. Problem of design feature-based simplification method.

다른 예로 Fig. 3의 경우, 스텝과 드릴링 홀(drilling hole)로 구성된 이 모델은 드릴링 홀의 체적이 스텝의 체적보다 크다. 따라서 모델을 단순화시킬 경우 스텝이 드릴링 홀보다 먼저 제거되어야 한다. 설계 시 사용된 특징형을 기반으로 하는 단순화 방법을 사용한다면, 모델 생성시, 드릴링 홀의 기준면이 어디냐에 따라서 단순화의 결과는 완전히 달라진다. 만일 스텝을 먼저 생성하고 스텝의 생성 결과로 생긴 B면을 기준으로 드릴링 홀을 생성했을 경우에, 단순화를 위해서 스텝을 먼저 제거하면 그림에서 보듯이 바람직하지 않은 결과가 초래된다. 이것은 서로 영향을 끼치는 특징형상들의 분해가 교차하지 않기 때문에 발생하는 문제로서, 단순화의 결과가 설계자의 설계방법에 전적으로 의존함을 볼 수 있다.

3. 블록분해를 이용한 단순화

3.1 방법의 개요

앞서 관련 연구 고찰에서 언급했듯이, 디자인특징형을 기반으로 한 방법들의 문제점을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 타 시스템에서 변환된 STEP/IGES와 같은 CAD 모델의 경우 적용이 불가능하다.
- 설계자의 모델링 방법 및 순서에 따라 같은 상세 수준에서 서로 다른 또는 전혀 바람직하지 않은 결과가 나올 수 있다.

이 두 가지 문제점을 해결하기 위해서는 특정 상세 수준에서 제거되어야 할 형상들이 모델링 시에 사용된 디자인 특징형상이 아니라, 최종 모델로부터 특징 방법에 의해 인식 또는 유추된 특징형을 이용하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 최종형상으로부터 특징형상 인식방법에 의해 인식되는 특징형을 솔리드 모델의 단순화에 이용하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 기존의 특징형상인식 방법들은 주로 절삭가공 특징형상 인식에 집중되어 있으며, 인식된 절삭가공 특징형상의 응용분야도 자동공정계획생성(computer-aided process planning), 공구경로생성 및 가공성평가(manufacturability analysis) 등에 국한되어 있다. 기존의 응용분야와는 달리, 본 논문에서는 특징형상 인식방법 중 블록분해 방법을 이용하여 절삭가공부품 솔리드 모델의 단순화에 적용하는 방법을 제시한다.

절삭 가공은 밀링, 드릴링 등의 방법을 이용하여 원재료로부터 특정한 부분을 깎아내는 기계공작법으로

기계부품을 직접 제작하거나, 사출성형을 위한 금형의 제작, 주조로 제작된 부품의 피니쉬 가공 등 다양한 분야에서 널리 사용되는 기계 가공법이다. 이러한 절삭 가공의 특징은 원재료에서 특정부분을 오직 제거만 하는 것으로, 가공하고자 하는 부품의 최종형상과 원재료의 차이부분을 상황에 맞는 가공방법으로 제작한다.

여기서 주목할 점은 가공이 진행될수록 원재료가 점점 더 복잡해져 최종형상의 부품으로 만들어 진다는 점이다. 즉, 가장 단순한 상태의 원재료에서 가장 복잡한 상태의 최종부품을 만드는 데는 여러 단계의 가공공정이 있으며, 각 가공공정이 완성된 단계를 단순화의 단계와 관련지을 수 있다. 이러한 점에 착안하여 최종형상으로부터 인식된 특징형상을 체계에 따라 정렬하고 이를 순서대로 적용함으로써 해당 솔리드 모델을 단순화하는 방법을 고안하였다.

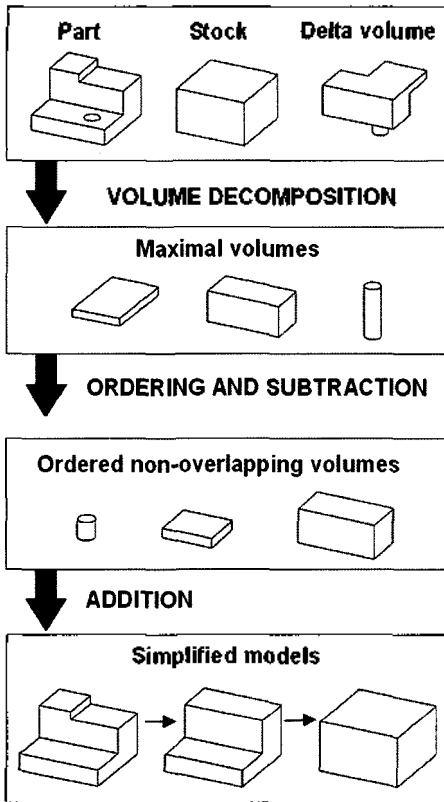


Fig. 4. Overview of simplification for solid model of machined part by volume decomposition.

본 논문에서 제시하는 절삭가공 부품의 단순화의 방법은 다음과 같다. 먼저 기존의 절삭가공특징형상

인식방법중의 하나인 맥시말 볼륨 분해^[15-17] (maximal volume decomposition) 방법을 이용하여 단순화 대상 부품의 솔리드 모델과 원재료 솔리드 모델의 차인 델타볼륨(delta volume)을 단순한 형상의 절삭가공 특징형상 형태의 볼륨으로 분해한다. 그 다음 이 볼륨들을 정해진 규칙에 의하여 작고 자세한 볼륨부터 큰 볼륨 순으로 정렬한다. 이렇게 정렬된 볼륨들을 서로 교차하지 않는 실제 볼륨으로 변환한 후 이를 이용하여 가공전의 원재료인 스톡(stock)으로부터 부품의 최종형상까지 원하는 수준의 단순화를 구현한다. 전체적인 방법의 개요는 Fig. 4에 나타나 있으며, 각 단계에 대한 상세한 설명을 다음 절들에서 설명한다.

3.2 델타볼륨의 분해

최종 부품으로부터 절삭가공 특징형상을 인식하는 방법은 여러 가지가 있다. 면과 선분을 그래프로 표현하고 이로부터 특정한 형상의 그래프 패턴을 인식하는 그래프기반 방법^[11,12], 형상으로부터 가공과 관련된 힌트를 유추하여 이로부터 특징형상을 인식하는 힌트기반 방법^[13,14], 볼륨을 분해하여 특징형상을 인식하는 볼륨분해기반 방법^[15-17] 등이 있다. 그래프기반방법은 상대적으로 인식 속도가 빠르나, 패턴으로부터 인식할 수 있는 형상의 종류가 제한되어 있으며, 특히 서로 교차하는 특징형상의 경우에 인식이 불가능하다는 단점이 있다. 반면에 볼륨분해기반 방법은 인식 속도는 상대적으로 떨어지나, 서로 교차하는 특징형상을 인식할 수 있고, 또한 특징형상을 볼륨의 형태로 인식하기 때문에 다른 방법과 달리 추가적으로 볼륨을 생성하는 단계가 필요 없다는 장점이 있다. 이러한 이유로 본 논문에서는 볼륨분해기반 방법의 하나인 맥시말 볼륨 분해 방법을 이용하여 솔리드 모델의 단순화에 이용할 특징형상을 인식한다.

앞서 언급했듯이, 원재료와 최종부품간의 체적의 차이, 즉 원재료에서 최종부품을 불리한 차 작업을 적용시킨 결과물을 델타볼륨(delta volume)이라 한다. 이 델타볼륨은 여러 절삭가공에 의해 제거되어야 할 체적들의 합으로 볼 수 있으며, 적절한 절삭작업에 의해 제거될 각각의 체적들은 절삭가공 특징형상이라 할 수 있다. 맥시말 볼륨 분해 방법을 이러한 델타볼륨에 적용하면, 델타볼륨이 여러 개의 단순한 형태의 볼륨으로 분해되며, 이 볼륨들은 모델의 최종형상으로부터 인식되는 감법 특징형상(subtractive features)으로서 이를 솔리드 모델의 단순화에 이용하면 감법/가법 특징형상의 구분없이 모두 감법 특징형상만으로 단순화를 할 수 있다.

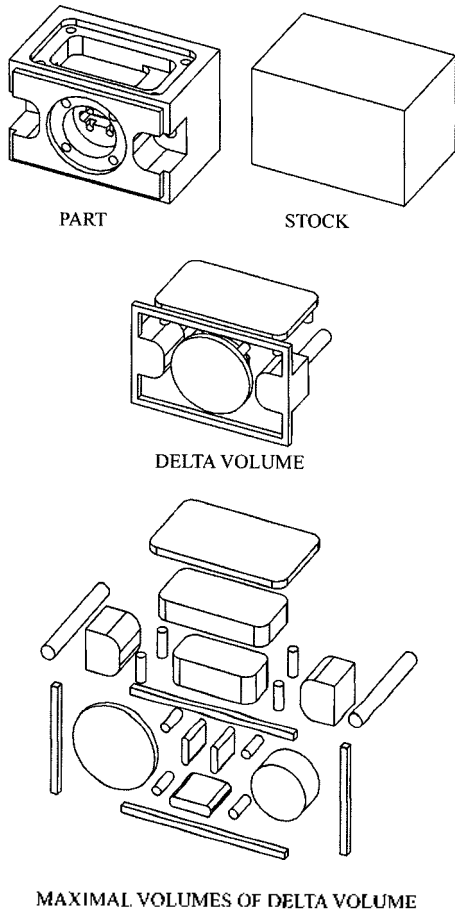


Fig. 5. Example of the maximal volume decomposition.

맥시말 볼륨 분해는 주어진 3차원 솔리드 모델을 오목한 변¹⁾(concave edge)을 포함하지 않는 단순한 형태의 볼륨으로 분해하는 방법으로서, 그 결과볼륨을 맥시말 볼륨 (maximal volume)이라 하며, 자세한 방법은 관련 문헌을 참고하기 바란다.

일반적으로 볼륨 V가 아래의 조건을 만족하면 V는 델타볼륨 Δ의 맥시말 볼륨이다:

1. $V \subset \Delta$
2. V는 concave edge를 포함하지 않는다.
3. V의 halfspace는 Δ의 halfspace이다.
4. V는 위의 세 조건을 만족하는 다른 어떤 볼륨에도 포함되지 않는다.

¹⁾두 개의 면의 경계로 공유되는 변(edge)가 있고, 이 변상의 한 점과 각각의 면에 tangent한 방향으로 정의되는 두 개의 직선이 솔리드 모델내부 쪽으로 이루는 각도가 180° 보다 큰 변을 오목한 변(concave edge)로 정의한다.

맥시말 볼륨 분해 방법을 델타볼륨에 적용하기 위해서는 먼저 가공전의 재료인 스톡볼륨(stock volume)을 정의하여야 하며, 본 논문에서는 사용자가 직접 스톡 볼륨을 입력하는 방법과 사용자의 스톡 볼륨 입력이 없을 시, 자동적으로 부품의 바운딩 박스(bounding box)를 이용하는 두 가지 방법을 사용하였다. 이렇게 정의된 스톡볼륨과 절삭부품 솔리드 모델의 불리안차가 델타볼륨이며, 이를 맥시말 볼륨으로 분해한다. 델타볼륨의 맥시말 볼륨은 대부분 그 자체가 절삭가공 특징형상이다. Fig 5는 절삭가공 부품과 델타볼륨, 그리고 델타볼륨의 맥시말 볼륨의 예이다.

3.3 맥시말 볼륨의 정렬 및 실제볼륨의 생성

솔리드 모델을 단순화시키는 데 있어 고려해야 할 점은 지정된 상체 수준에서 어떤 형상을 제거할 것이냐 하는 제거 기준이다. 이러한 제거기준은 응용분야 및 적용 상황에 따라 다를 수 있으나, 형상의 디자인 기능(design function)과 관련된 중요도 (dominance)가 일반적인 기준이라 할 수 있을 것이다. 또한 형상의 중요도를 판단하는 방법으로는 그 형상의 크기 및 체적을 들 수 있다. 모델의 전체 크기 또는 체적에 비교하여 어떤 형상의 크기/체적이 상대적으로 크다는 것은 그만큼 그 형상이 전체 모델의 형태와 기능에 있어 지배적이라 할 수 있다.

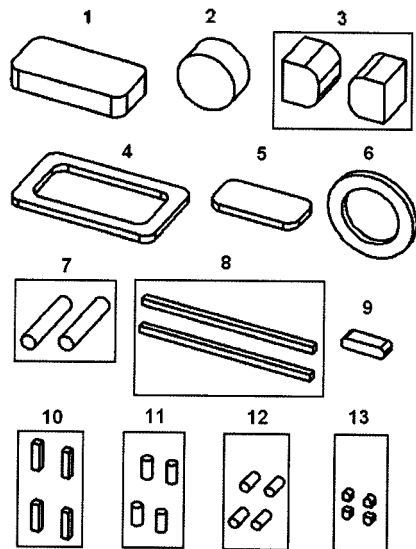


Fig. 6. Non-overlapping ordered maximal volumes of the part shown in Fig. 5.

물론 절삭부품의 경우 그 부품을 제작하는 가공순서도 중요한 고려대상이 될 수 있을 것이다. 예를 들

면 때, 가공 순서는 셋업(set-up)을 최소화하여 정밀성과 효율성을 높인다던 지, 가공 측면에 있어 어느 형상이 다른 형상보다 우선해서 가공되어야 한다던 지 하는 것을 들 수 있다. 이재열^[10] 및 이상현^[12] 역시 제거기준을 형상의 체적으로 삼았으며, 본 연구에서도 분해된 맥시말 볼륨의 체적을 제거기준으로 적용하였다.

본 연구에서는 체적을 기준으로 맥시말 볼륨을 정렬하였으며 다음과 같은 방법을 이용하였다.

1. 맥시말 볼륨들의 체적을 계산한다.
2. 최대 체적을 가진 맥시말 볼륨을 선택한다.
3. 선택된 맥시말 볼륨의 복사본을 선택되지 않은 모든 맥시말 볼륨들에 대하여 Boolean subtraction을 수행한다.
4. 3단계에서 변경된 맥시말 볼륨들의 체적을 계산한다.
5. 최대 체적을 가진 맥시말 볼륨을 선택한다.

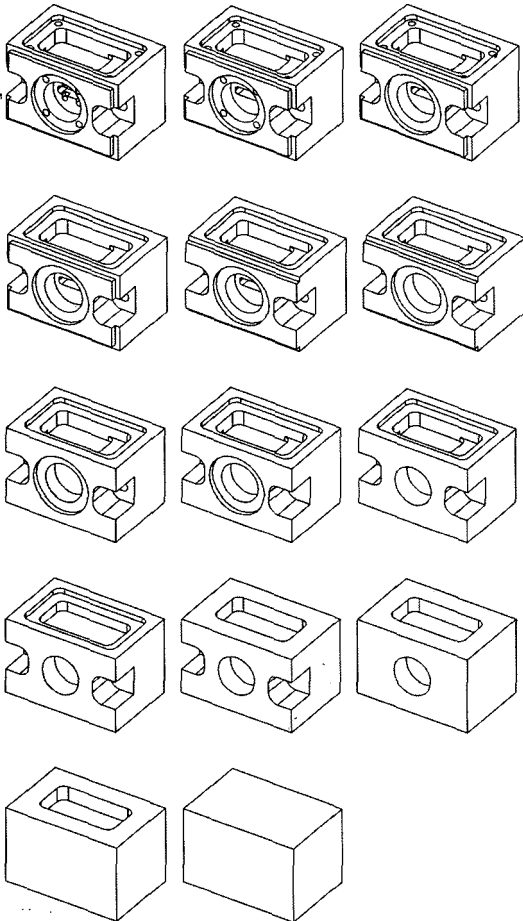


Fig. 7. Simplification results for the part shown in Fig. 5.

6. 모든 맥시말 볼륨이 선택될 때까지 3-5단계를 반복한다.

이와 같은 방법을 사용함으로써, 맥시말 볼륨의 정렬은 물론 모델 단순화에 사용될 실제 볼륨(actual volume)의 생성까지 동시에 진행된다. 여기서 실제 볼륨이란 단순화에 사용될 다른 맥시말 볼륨들과 서로 겹치지 않는 볼륨을 의미한다. 실제 볼륨들의 합은 델타볼륨과 같다. Fig. 6은 Fig. 5에 보여진 절삭부품 델타볼륨의 맥시말 볼륨을 앞서 설명한 방법에 의해 정렬된 실제 볼륨을 보여주고 있다.

3.4 Boolean union을 이용한 모델의 단순화

체적에 의해 내림차순으로 정렬된 맥시말 볼륨의 실제볼륨이 생성되면, 이를 Boolean union을 이용하여 오리지널 모델에 더해줌으로써 단순화 작업이 이루어진다. 단순화의 정도는 오리지널 모델의 경우 0%, 완전히 단순화가 이루어졌을 때 100%로 표시하며, 100% 단순화가 이루어졌을 때의 모델은 스톱모델과 같다. 따라서 단순화가 진행됨에 따라 내림차순으로 정렬된 볼륨들을 작은 체적의 볼륨부터 큰 체적의 볼륨 순으로 오리지널 모델에 더해지게 된다. Fig. 7은 Fig. 5에 있는 절삭부품 솔리드 모델의 단순화를 구현한 예를 보여주고 있다.

4. 시스템 구현

본 논문에 제안된 방법들을 윈도우 플랫폼상에서 Spatial사의 ACIS geometric modeler 및 C/C++를 이용하여 구현하였다. Fig. 8은 구현된 시스템의 스크린샷이다.

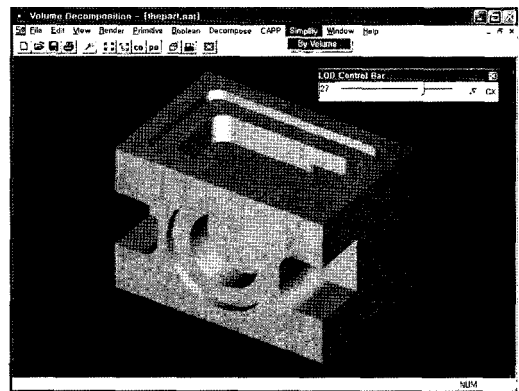


Fig. 8. Screenshot of the system implemented by the method presented in this paper.

이 시스템의 구현에 사용된 PC의 사양은 펜티엄4 3.0GHz CPU, 1GB 메모리이며 Windows XP 운영체제이다. 이 시스템에서 Fig. 8에 있는 솔리드 모델을 단순화하는데 소요된 전체 시간은 3.1 cpu seconds로, 블룸분해를 이용해 단순화에 필요한 맥시멈 볼륨을 얻는 데 약 1.8 cpu seconds, 이를 이용하여 가장 단순화된 모델로 변환하는데 약 1.3 cpu seconds의 시간이 소요되었다. 이재열 및 이상현 등이 제안한 설계특징형상 기반 방법의 성능은 직접 측정 및 비교할 수는 없었으나, 불리안 작업의 양으로만 볼 때 이론상으로 소요시간이 더 짧을 것으로 추론하나, 실제로 사용자가 느끼는 성능의 차이는 크지 않으리라 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 디자인 특징형상들을 기반으로 솔리드 모델을 단순화 하는 기존의 방법들의 문제점을 보완할 수 있는 새로운 모델 단순화 방법을 제시하였다. 특히 최종모델의 델타볼륨의 분해를 이용하여 생성된 감법 특징형상들만을 이용하여 모델 단순화를 구현함으로써, STEP과 같은 정적인 CAD모델에도 적용할 수 있을 뿐 아니라, 설계자의 모델링 습관이나 방법 및 순서에 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 특히 일정 상세수준 이하의 절삭가공 특징형상이 제거된 단순화된 모델이므로, 이를 이용하여 형상적 또는 생산 공정 면에서 포괄적 유사성을 가진 부품을 검색하는 데 유용하게 사용될 수 있다^[5].

하지만 감법 특징형상들을 사용함으로써 절삭가공 부품 솔리드 모델의 단순화에는 효과적으로 적용할 수 있으나, 감법 특징형상만으로 표현되기 어려운 다른 가공 방법에 의해 제작되는 부품의 경우에는 단순화의 결과가 직관적이지 않은 경우가 발생할 수 있다. 예를 들어, Fig. 9에 보여진 모델의 경우 사용자는 일반적으로 A와 같은 단순화의 결과를 예상하나,

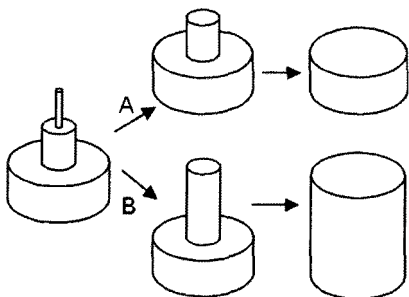


Fig. 9. An example of non-intuitive simplification.

본 방법은 B와 같이 단순화를 생성한다. 따라서, 이러한 단점을 보완할 수 있도록 향후 과제로 가법특징형상을 포함한 일반적인 특징형상을 가진 솔리드 모델의 단순화에 관한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 한성대학교 교내연구비 지원 과제로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이상현, 이규열, “특징형상기반 다중해상도 모델링에 관한 연구 - Part I: 특징형상의 유효영역”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제10권, 제6호 pp. 432-443, 2005.
2. 이상현, 이규열, “특징형상기반 다중해상도 모델링에 관한 연구 - Part II: 시스템 구현 및 상세수준 판단기준”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제10권, 제6호, pp. 444-454, 2005.
3. Lee, S. H., “Feature-based Multiresolution Modeling of Solids”, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1417-1441, 2005.
4. 김민철, 이진우, 김성찬, “다중해상도 알고리즘을 이용한 자동 해석모델 생성”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 172-182, 2006.
5. 홍태식, 이진우, 김성찬, “다중해상도 개념을 이용한 기계부품의 유사성 비교”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제11권, 제4호, pp. 316-326, 2006.
6. Koo, S. and Lee, K., “Wrap-around Operation to Make Multi-resolution Model of Part and Assembly”, *Computers & Graphics*, Vol. 26, pp. 687-700, 2002.
7. 김민철, 이진우, 김성찬, “다중해상도 알고리즘을 이용한 자동 해석모델 생성”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 172-182, 2006.
8. 김성찬, 이진우, 홍태식, 김민철, 정문기, 송영재, “B-rep의 다중해상도를 구현하는 통합시스템 개발”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제11권, 제4호, pp. 289-302, 2006.
9. 최동혁, 김태완, 이진우, “특징형상 변환을 이용한 B-rep 모델의 다중해상도 구현”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 121-130, 2002.
10. 이재열, 이주행, 김현, 김형선, “셀룰러 토폴로지를 이용한 프로그레시브 솔리드 모델 생성 및 전송”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제9권, 제2호, pp. 122-132, 2004.
11. Henderson, M. R., “Extraction of Feature Information from Three Dimensional CAD Data”, PhD Thesis, Purdue University, USA, 1984.
12. Joshi, S. and Chang, T. C., “Graph-based Heuristics for Recognition of Machined Features from a 3D Solid Model”, *Computer Aided Design*, Vol. 20, No.

- 2, pp. 58-66, 1988.
13. Regli, W. C., Gupta, S. K. and Nau, D. S., "Extracting Alternative Machining Features: An Algorithmic Approach", *Research in Engineering Design*, Vol. 7, No. 3, pp. 173-192, 1995.
14. Han, I. and Requicha, A. G., "Integration of Feature-based Design and Feature Recognition", *Proceeding of the Computers in Engineering Conference and Engineering Database Symposium ASME*, pp. 569-578, 1995.
15. Sakurai, H. and Dave, P., "Volume Decomposition and Feature Recognition: Part I-polyhedral Objects", *Computer Aided Design*, Vol. 27, No. 11, pp. 833-843, 1995.
16. Sakurai, H. and Dave, P., "Volume Decomposition and Feature Recognition: Part II-curved Objects", *Computer Aided Design*, Vol. 28, pp. 519-537, 1996.
17. Woo, Y., "Fast Cell-based Decomposition and Appli-

cations to Solid Modeling", *Computer Aided Design*, Vol. 35, pp. 969-977, 2003.



우 윤 환

1993년 한양대학교 정밀기계공학과 학사
1995년 Illinois Institute of Technology
기계공학과 석사

1999년 Colorado State University 기계
공학과 박사

1999년~2002년 미국 Spatial Corp/
Dassault Systems ACIS 개발팀
소프트웨어 엔지니어

2002년~2004년 국민대학교 자동차공학전문대학원 연구교수
2004년~2005년 성균관대학교 기계기술연구소 연구교수
2006년~현재 한성대학교 기계시스템공학과 전임강사
관심분야: 3D geometric modeling, Feature recognition, CAPP