

## 설계 특징형상 인식을 고려한 단계적 볼륨 분해

김병철<sup>1</sup> · 김익준<sup>2</sup> · 한순흥<sup>3</sup> · 문두환<sup>4†</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 기계공학과, <sup>2</sup>한국과학기술원 기계공학과,  
<sup>3</sup>한국과학기술원 해양시스템공학과, <sup>4</sup>경북대학교 정밀기계공학과

### Stepwise Volume Decomposition Considering Design Feature Recognition

Byung Chul Kim<sup>1</sup>, Ikjune Kim<sup>2</sup>, Soonhung Han<sup>3</sup>, and Duhwan Mun<sup>4†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, KAIST

<sup>3</sup>Department of Ocean Systems Engineering, KAIST

<sup>4</sup>Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University

Received 21 November 2012; received in revised form 2 January 2013; accepted 14 January 2013

#### ABSTRACT

To modify product design easily, modern CAD systems adopt the feature-based model as their primary representation. On the other hand, the boundary representation (B-rep) model is used as their secondary representation. IGES and STEP AP203 edition 1 are the representative standard formats for the exchange of CAD files. Unfortunately, both of them only support the B-rep model. As a result, feature data are lost during the CAD file exchange based on these standards. Loss of feature data causes the difficulty of CAD model modification and prevents the transfer of design intent. To resolve this problem, a tool for recognizing design features from a B-rep model and then reconstructing a feature-based model with the recognized features should be developed. As the first part of this research, this paper presents a method for decomposing a B-rep model into simple volumes suitable for design feature recognition. The results of experiments with a prototype system are analyzed. From the analysis, future research issues are suggested.

**Key Words:** Boundary representation, Cell-based decomposition, Design feature recognition, Feature-based model, Stepwise volume decomposition, Volume split, Wrap-around operation

## 1. 서 론

현대의 CAD 시스템들은 설계 변경을 용이하게 하기 위해서 특징형상 기반 모델(feature-based

model)을 주요 표현 방법으로 채택하고 있다. 그리고 CAD 모델의 가시화 및 기하계산, 사용자 상호작용 등을 위해 경계표현법(boundary representation, B-rep)을 부수적인 표현 방법으로 사용한다<sup>[1]</sup>.

대표적인 CAD 파일 교환 형식인 IGES와 STEP AP203 edition 1은 B-rep 모델만을 지원하기 때문에, 이 파일 형식으로 CAD 모델을 저장하면 특징

<sup>†</sup>Corresponding Author, dhmun@knu.ac.kr  
©2013 Society of CAD/CAM Engineers

형상 정보를 잃어버리게 된다. 이는 IGES와 STEP 파일 형식을 이용하여 교환한 CAD 모델의 설계 변경을 어렵게 한다.

저자들은 이 문제를 해결하기 위해, STEP AP203 edition 1 형식으로 교환된 B-rep 모델에서 설계 특징형상(design feature)을 인식하여 특징형상 기반 모델을 재구성하기 위한 방법을 연구 중이다. 이 논문에서는 연구의 첫 번째 단계로 설계 특징형상 인식을 고려하여 B-rep 모델을 단순 볼륨으로 분해하는 단계적 방법을 제안한다.

논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 관련 연구 현황을 살펴본다. 3절과 4절에서는 단계적 볼륨 분해 방법을 제안한다. 5절에서는 테스트 케이스에 대해서 단계적 볼륨 분해를 적용한 실험 결과를 설명하고, 5절에서는 제안한 방법의 개선 방향에 대해서 논의한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 CAD 모델 교환

기존의 STEP AP203 edition 1 형식이 B-rep 모델만을 지원한다는 단점을 극복하기 위해서 STEP Parametrics Group에서는 특징형상 기반 모델을 교환하기 위한 새로운 표준 형식인 STEP AP203 edition 2를 제정하였다<sup>[1]</sup>. 그러나 아직까지 이를 지원하는 상용 시스템은 없는 상황이다. 이와 유사하게 CAD 모델 생성 및 변경 이력을 기록한 매크로 파일을 교환하는 매크로 파라메트릭 방법(macro-parametric approach)<sup>[2-5]</sup>과 상용 CAD 시스템의 특징형상 정보를 수용할 수 있는 UPR(universal product representation) 구조에 기반한 교환 방법<sup>[6]</sup>이 제안되었다. 그러나 이 방법들은 입력 정보로 특징형상 모델 정보가 필요하기 때문에, B-rep 모델이 주어진 경우에는 적용할 수 없어 적용 범위가 제한적이다.

### 2.2 가공 특징형상 인식

CAD와 CAM을 통합시키기 위해 B-rep 모델로부터 특징형상을 인식하기 위한 연구가 1980년대부터 진행되었다. 대표적인 방법으로는 그래프 기반(graph-based) 방법<sup>[7-10]</sup>, 힌트 기반(hint-based) 방법<sup>[11]</sup>, 볼륨 분해(volume decomposition) 방법<sup>[12-15]</sup>이 있다.

그래프 기반 방법에서는 형상의 면과 모서리의

관계를 그래프 구조로 표현하고, 부그래프(subgraph)가 가공 특징형상의 특징 패턴과 일치하는지를 분석하여 특징형상을 인식한다. 그러나 여러 특징형상이 교차하는 부분은 인식하기가 어렵다는 단점이 있다. 힌트 기반 방법은 특징형상의 완전한 패턴을 찾는 대신 특징형상 인식을 위한 최소한의 흔적, 즉 힌트로부터 기하추론 과정을 거쳐 특징형상을 찾는다. 그러나 특징형상 인식을 위한 힌트를 정의하기 어렵다는 단점이 있다.

볼륨 분해 방법은 복잡한 형상을 단순한 볼륨으로 분해한 후, 단순 볼륨으로부터 가공 특징형상을 인식하는 방법이다. 볼륨 분해 방법은 볼륨을 분해하는 방법에 따라서 컨벡스 분해(convex decomposition) 방법<sup>[12,13]</sup>과 셀 기반 분해(cell-based decomposition) 방법<sup>[14,15]</sup>으로 나뉜다. 컨벡스 분해 방법은 형상의 컨벡스헐(convex hull)과 델타 볼륨(delta volume)으로 분해해 나가는 방법이다. 이 방법에서는 분해된 볼륨들의 불리언 합(Boolean union)과 차(Boolean subtraction)의 CSG(constructive solid geometry) 트리 구조로 원본 형상이 표현된다. 따라서 가공 특징형상 인식을 위해서는 불리언 합으로 표현된 볼륨을 불리언 차 형태로 변환해 주어야 한다. 곡면이 들어간 형상에 대해서는 컨벡스헐을 정의하기가 어렵기 때문에, 곡면이 들어간 경우에는 적용할 수 없다.

셀 기반 분해 방법은 형상을 단순한 셀(cell)로 분해한 후, 셀을 조합하여 최대 볼륨(maximum volume, MV)을 구성한 후에 특징형상을 찾아내는 방법이다. 이 방법에서는 MV들의 불리언 합으로 원본 형상을 표현할 수 있다. 이 방법에서는 또한 구, 원통, 원뿔과 같은 2차곡면(quadric surface)을 처리할 수는 있다. 그러나 셀을 조합하여 MV를 찾는데 걸리는 시간이 셀의 개수에 지수적으로 증가하기 한다는 단점이 있다.

### 2.3 설계 특징형상 인식

기계 가공에서는 피삭재에서 볼륨을 제거하는 작업이 반복된다. 그러나 기계 설계에서는 빈 공간에서 볼륨을 추가하고 제거하는 작업이 혼합되어 반복된다. 예를 들어, Fig. 1(a)의 파트를 표현하기 위해서는 Fig. 1(b)에서와 같이 피삭재에서 한 개의 스텝(step) 볼륨과 한 개의 홀(hole) 볼륨을 빼주어야 한다. 그러나 기계 설계에서는 기본 블록에 형상을 추가한 다음, 홀 볼륨을 빼주어야

한다. 또한 가공 특징형상 인식에서는 형상의 오목한 특징(concavity)이나 가공 공구의 접근 방향을 이용할 수 있지만, 설계 특징형상 인식에서는 이러한 특징의 활용이 제한적이다. 인식해야 할 특징형상의 종류도 설계 특징형상이 더 많다. 이와 같은 기계 가공과 기계 설계의 차이로 인해 가공 특징형상의 인식 방법을 설계 특징형상 인식에 바로 적용할 수 없다.

본 연구에서는 설계 특징형상 인식을 위해 볼륨 분해 방법을 이용한다. 그러나 기존 방법을 바로 적용하기에는 몇 가지 문제점이 있다.

컨벡스 분해 방법은 Fig. 1(c)와 같이, 형상을 추가해 주는 가산 특징형상(additive feature)과 형상을 제거해 주는 감산 특징형상(subtractive feature)으로 자연스럽게 분해되기 때문에 설계 특징형상

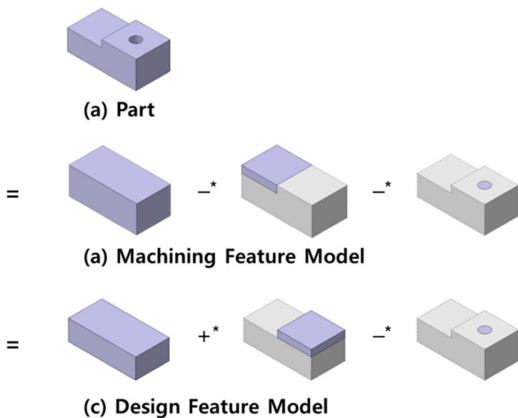


Fig. 1 A part with different feature models

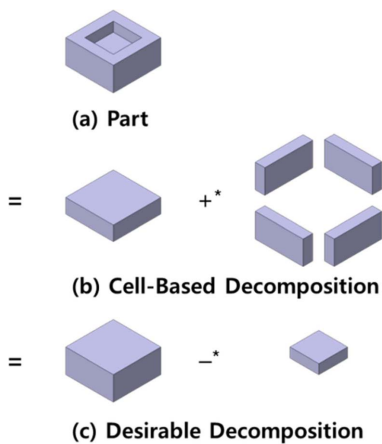


Fig. 2 Cell-based decomposition and desirable decomposition of a part

으로 구성된 형상 표현에는 적합하나 곡면이 포함된 형상에는 적용할 수 없다. 셀 기반 분해 방법은 곡면이 포함된 형상을 처리할 수는 있지만, 설계 형상에 적용할 경우 Fig. 2(b)와 같이 모든 특징형상이 가산적 특징형상으로 표현된다. 그러나 Fig. 2(c)와 같이 분해하는 것이 더 바람직하다. 또한, 셀 기반 분해 방법은 처리시간이 오래 걸린다는 단점이 있기 때문에 처리시간을 줄이기 위한 방법이 필요하다.

우윤환은 시간이 오래 걸리는 셀 기반 분해방법의 단점을 극복하기 위해 선택적 볼륨분해 방법<sup>[16,17]</sup>을 제안하였다. 이 방법에서는 설계 모델 전체에 대한 특징형상을 인식하는 것이 아니라, 사용자가 선택한 부분에 대해서만 단순 볼륨 형태로 형상을 분해한다. 그러나 감산적 특징형상에는 적용할 수 없기 때문에 바운딩 박스를 이용한 추가적인 방법<sup>[18]</sup>을 제안하였다. 그러나 이 방법에서도 감산적 특징형상이 다른 가산적 특징형상에 영향을 받을 경우에는 적용할 수 없고, 추출하고자 하는 특징형상이 가산적인지 감산적인지를 사용자가 직접 지정을 해주어야 한다.

김재현은 분해되는 셀의 개수를 줄이기 위해 기준 특징형상(reference feature)을 이용하여 좀 더 단순하게 분해하는 방법<sup>[19]</sup>을 제안하였다. 이 방법을 이용하면 가산적 특징형상과 감산적 특징형상을 구분하는 것이 가능하다. 그러나 한 개의 오목한 모서리로 이루어진 단순한 형상에 대해서는 적용할 수 없고, 곡면을 기준 특징형상으로 사용할 수 없다. 또한 복잡한 형상의 경우, 기준 특징형상이 전체 형상을 의도하지 않은 형태로 분할할 수도 있다.

김익준은 셀 기반 분해 방법을 이용하여 특징형상 기반 모델을 생성하는 방법<sup>[20]</sup>을 제안하였다. 그러나 아직 초기 연구 단계이고 앞에서 언급한 설계 특징형상이 가지는 특성을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 설계 특징형상 인식을 위해 셀 기반 분해 방법을 이용한다. 그러나 Fig. 2(c)의 형태로 볼륨을 분해할 수 있도록 셀 기반 분해 전에 래퍼라운드(wrap-around) 연산 및 볼륨 분할(volume split)을 단계적으로 적용한다. 또한 인식률을 높이기 위해 볼륨 분해 전, 필렛(fillet), 라운드(round), 모따기(chamfer)에 대한 볼륨을 제거하는 절차를 거친다.

### 3. 단계적 볼륨 분해 절차

#### 3.1 설계 특징형상 인식 절차

본 연구에서 제안하는 특징형상 인식 절차는 Fig. 3과 같다.

- ① B-rep 모델을 단순한 형상을 가진 볼륨(volume)으로 분해한다.
- ② 볼륨을 조합하여 인식할 수 있는 형상을 생성한다.
- ③ 인식된 형상으로부터 특징형상을 정의하기 위한 파라미터(parameter)를 추출한다.

본 논문에서는 이 중 첫 번째 절차에 초점을 맞추고 있으므로, 본 절 이후부터는 B-rep 모델의 볼륨 분해 방법에 대해서 설명한다.

#### 3.2 볼륨 분해 절차

본 연구에서 제안하는 볼륨 분해 방법은 다음과 같은 요구조건을 만족시키기 위해 고안되었다.

- ① 볼륨 분해를 적용한 후, 원본 B-rep 모델은 볼륨들에 대한 불리언 합(Boolean union)과 차(Boolean subtraction) 연산으로 표현할 수 있어야 한다.
- ② 2차곡면을 가진 B-rep 모델에 대한 볼륨 분해가 가능해야 한다.
- ③ 복잡한 형상에 대해서 합리적인 시간 내에 볼륨 분해가 가능해야 한다.

위의 요구조건을 만족시키기 위해, 본 연구에서는 단계적 볼륨 분해 방법을 제안하며, 그 절차는 Fig. 4와 같다.

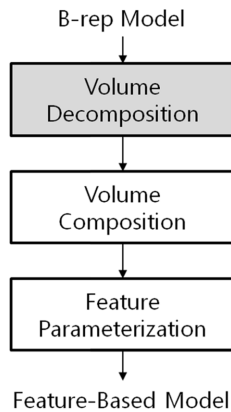


Fig. 3 Feature recognition procedure

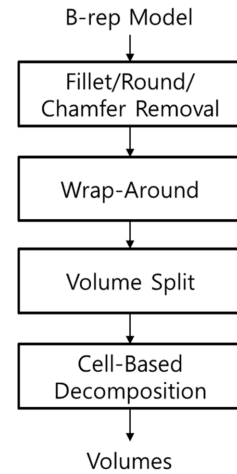


Fig. 4 Stepwise volume decomposition procedure

- ① B-rep 모델에서 필렛(fillet), 라운드(round), 모따기(chamfer)를 찾아 제거한 후, 이를 이용하여 볼륨을 분해한다.
- ② 구멍과 같이 파인 형상을 제거하기 위해 랩어라운드(wrap-round) 연산을 적용하여 볼륨을 분해한다.
- ③ 형상을 두 부분으로 분할할 수 있는 경우 볼륨 분할(volume split) 연산을 적용하여 볼륨을 분해한다.
- ④ 셀 기반 분해를 적용한다.

랩어라운드와 볼륨 분할은, 경우에 따라서는, 순서를 바꾸는 것이 더 합리적인 볼륨 분해 결과를 얻을 수 있다. 따라서 이 연구에서는 사용자가 두 연산의 순서를 선택하도록 하였다.

랩어라운드 연산은 볼록한 내부 루프(convex inner loop)를 이용하고, 볼륨 분할은 오목한 내부 루프(concave inner loop)를 이용한다. 그러나 셀 기반 분해를 적용하면 내부 루프(inner loop)가 사라지기 때문에 더 이상 볼륨 분해를 진행할 필요가 없다.

랩어라운드 연산과 볼륨 분할은 형상의 오목한 모서리 일부를 제거해 주기 때문에, 셀 기반 분해를 적용할 때 생성되는 셀의 개수가 줄어든다. 이는 셀 기반 분해의 처리속도를 높여준다.

셀 기반 분해를 적용하기 위해서는 곡면을 확장할 수 있어야 하기 때문에 2차곡면에 대해서만 적용할 수 있다. 자유곡면을 경계에서 곡면에 접하는 방향으로 확장하면 셀 기반 분해를 적용할 수

있지만 의미있는 결과를 얻기 어렵다.

단계적 볼륨 분해 절차를 적용하면 Fig. 5와 같은 특징을 갖는 구성트리(composition tree)가 생성된다. 구성트리가 B-rep 모델의 볼륨 분해 결과가 된다. 구성트리는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- ① 구성트리의 노드(node)는 볼륨을 표현하고, 모서리(edge)는 볼륨이 가산적 또는 감산적 인지를 표현한다. 가산적(positive)인 경우 볼륨을 정규화된 불리언 합(regularized Boolean union) 연산을 이용해 더해주고, 감산적(negative)인 경우 정규화된 불리언 차(regularized Boolean subtraction) 연산을 이용해 볼륨을 빼준다.
- ② 구성트리의 근 노드(root node)는 원본 B-rep 형상이다.
- ③ 구성트리의 잎 노드(leaf node)는 더 이상 분해할 수 없는 볼륨이다.
- ④ 구성트리의 부모 노드(parent node)는 자식 노드들(child nodes)의 불리언 연산 결과이다.
- ⑤ 형제 노드(sibling nodes) 간에는 순서를 갖는다. 즉, 먼저 나타나는 노드의 연산을 우선 적용한다.

단계적 볼륨 분해 절차에 따라 B-rep 모델을 분해하면, 매 단계마다 추가적으로 자식 노드가 삽입된다. 그리고 최대 볼륨 분해가 종료되면 최종 구성트리가 완성된다. 이 때, 잎 노드가 단계적 볼륨 분해로 얻는 최종 볼륨이 된다.

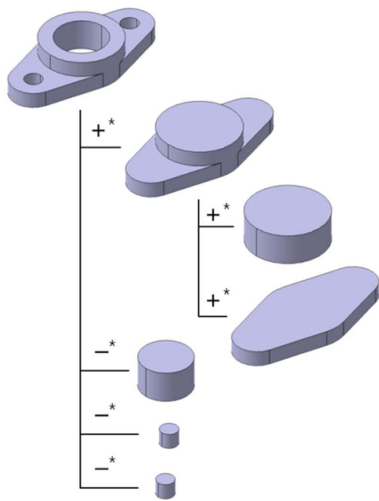


Fig. 5 Composition tree representation of volume decomposition

## 4. 볼륨 분해 상세 기법

### 4.1 필렛/라운드/모따기 제거

필렛(fillet)과 라운드(round)는 날카로운 모서리 또는 꼭지점을 부드럽게 하고, 집중되는 응력집을 분산시켜 강도를 높여주는 목적으로 사용하는 특징형상이다. 그러나 필렛과 라운드는 형상을 복잡하게 하여 특징형상 인식을 어렵게 만든다<sup>[19,21]</sup>. 셀 기반 분해를 할 경우, 볼륨을 분해하는 기준으로 오목한 모서리가 사용되지만 필렛과 라운드가 적용된 부분은 오목한 모서리가 제거되기 때문에 볼륨을 분해할 수 없다. 따라서 필렛과 라운드를 제거하여 형상을 단순하게 만들 필요가 있다. 모따기(chamfer)도 비슷한 이유로 사전 제거가 필요하다. 필렛과 라운드를 제거하기 위한 대표적인 방법으로 Zhu가 제안한 방법<sup>[21]</sup>이 있다. 그러나 본 연구에서는 ACIS 형상모델링 커널에서 제공하는 기능을 이용하였다.

필렛을 제거할 경우 원본 형상에서 볼륨이 제거되고, 라운드를 제거할 경우 원본 형상에 볼륨이 추가된다. 따라서 추가된 볼륨과 제거된 볼륨을 구성트리에 반영한다. 즉, 필렛과 라운드가 제거되기 전의 원본 형상을  $S$ 라고 하고, 필렛과 라운드가 제거된 후의 형상을  $T$ 라 하면, 필렛이 가지는 볼륨  $F$ 와 라운드가 가지는 볼륨  $R$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = S - ^*T$$

$$R = T - ^*S$$

$F$ 와  $R$ 을 이용하여  $S$ 를 구성트리로 표현하면 Fig. 6과 같다.

모따기의 경우도 ACIS 형상모델링 커널에서 제공하는 모따기 제거 기능을 이용하여 라운드/필렛과 동일한 방법으로 제거할 수 있다.

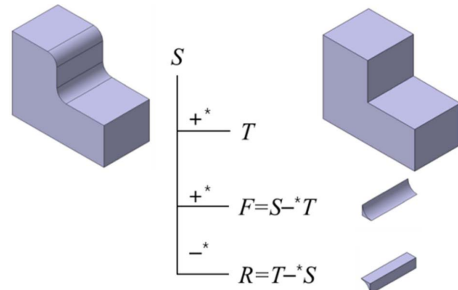


Fig. 6 Round/fillet removal and composition tree

#### 4.2 랩어라운드(Wrap-Around)

셀 기반 분해의 단점으로 지적되는 것 중의 한 가지가 연산 시간이다. 셀 기반 분해의 연산 시간은 셀의 개수에 대해 지수적으로 증가한다. 셀의 개수를 증가시키는 원인 중 한 가지가 볼록한 내부 루프(convex inner loop)이다. 따라서 내부 루프 제거를 통해 셀의 개수를 크게 줄일 수 있다.

셀 기반 분해로 분해된 볼륨들은 모두 가산적 볼륨이다. 이는 가공 특징형상에는 적합하지만, 가산적 볼륨과 감산적 볼륨을 모두 가지는 설계 특징형상에는 적합하지 않다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 셀 기반 분해를 적용하기 전에 Koo<sup>[22]</sup>가 제안한 랩어라운드(wrap-around) 연산을 단순화시켜 적용하였다. 랩어라운드 연산 적용 방법은 다음과 같다.

- ① 볼록한 내부 루프를 찾는다.
- ② 모든 면을 분리시킨다.
- ③ 볼록한 내부 루프를 가진 면에서 내부 루프를 제거한다.
- ④ 모든 면을 다시 재결합시킨다.
- ⑤ 솔리드를 구성하지 못하는 내부 면(interior face)를 제거한다.
- ⑥ 재결합한 솔리드와 원본 솔리드를 불리언 합 연산을 이용하여 합친다.

Fig. 7(a)는 랩어라운드 연산을 적용하기 전과 후의 결과이다. Fig. 7(a)에서 보면 홀처럼 파인 부분이

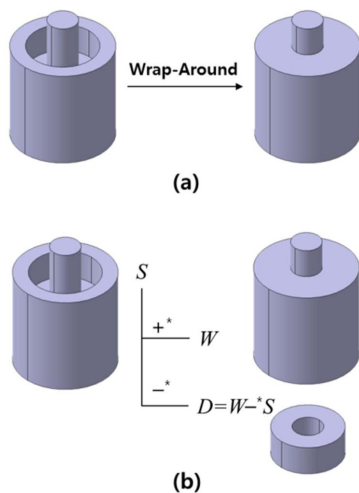


Fig. 7 Volume decomposition using wrap-around operation

이 사라졌고, 이로 인해 셀 기반 분해로 생성되는 셀의 개수가 줄어든다.

랩어라운드 연산 적용 전의 원본 형상을  $S$ , 적용 후의 형상을  $W$ 라고 하면,  $S$ 는 Fig. 7(b)와 같이  $W$ 와  $W-S$ 로 분해할 수 있다. 그러나 분해 후에도 Fig. 7(b)의  $D$ 처럼 다시 내부 루프가 생길 수 있으므로, 이 경우에는  $D$ 에 대해 다시 랩어라운드 연산을 적용해야 한다.

#### 4.3 볼륨 분할

형상이 오목한 내부 루프(concave inner loop)를 가질 경우에는, 이 루프를 기준으로 형상을 두 부분으로 분할할 수 있다. 본 연구에서는 이를 볼륨 분할(volume split) 연산이라 부른다. 이는 Kim의 컨벡스 분해 방법<sup>[23]</sup>에서 사용한 cutting 연산과 유사하다. 또한 김재현이 사용한 방법<sup>[19]</sup>과도 유사하다. 그러나 Kim과 김재현이 제안한 방법은 곡면이 있거나, 면이 꺾인 경우에는 잘 적용되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 단순히 오목한 내부 루프가 있는 경우에만 볼륨을 분할하였다. 볼륨 분할 연산 적용 방법은 Fig. 8과 같다.

- ① 형상  $S$ 의 오목한 내부 루프를 찾는다.
- ② 오목한 내부 루프를 가진 면의 복사본  $F$ 를

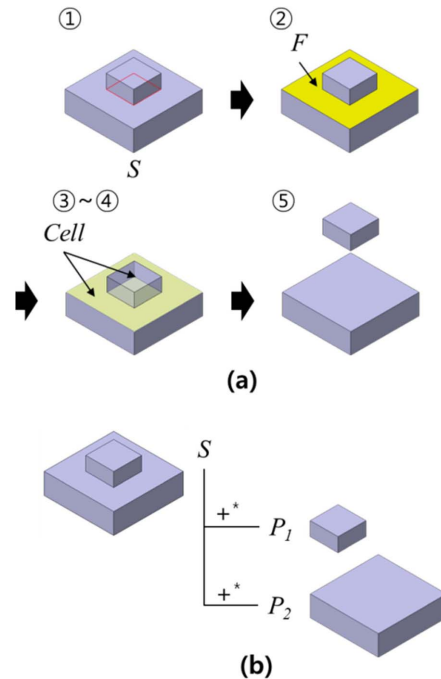


Fig. 8 Volume decomposition using volume split operation

생성한다.

- ③  $F$ 에서 내부 루프를 제거한다.
- ④  $S$ 와  $F$ 의 비정규화된 불리언 합(non-regularized Boolean union)을 구한다. 이 때, 형상은 두 개의 셀로 구분된다.
- ⑤ 각각의 셀을 볼륨으로 분리한다.

볼륨 분할 연산을 적용하면 오목한 모서리가 줄어들기 때문에, 셀 기반 분해로 생성되는 셀의 개수가 줄어든다. 또한, Fig. 8을 보면 큰 블록의 면  $F$ 를 참조면(reference face)으로 하여, 작은 블록이 추가되는 형태로 해석할 수 있다. 이는 설계 특징형상을 표현하는 자연스러운 방법이다. 그러나 셀 기반 분해에서는 이러한 표현이 어렵다.

랩어라운드 연산과 볼륨 분할 연산을 적용하는 목적 중 한 가지는 오목한 모서리를 제거하기 위한 것이다. 오목한 모서리의 제거를 위해서는 그래프 기반 방법도 적용할 수 있다. 그러나 그래프 기반 방법은 특징형상이 교차하는 경우, 추가적인 휴리스틱(heuristic) 알고리즘의 적용이 필요하다. 반면에 랩어라운드 연산과 볼륨 분할 연산은 추가적인 알고리즘 없이도 적용이 가능하다.

#### 4.4 셀 기반 분해

본 연구에서는 셀 기반 분해 방법 중 하나인 최대 볼륨 분해(maximal volume decomposition, MVD) 방법<sup>[14,15]</sup>을 사용한다. MVD에서는 B-rep 모델로 표현된 형상을 최대 볼륨(maximal volume,

MV)이라고 부르는 단순한 볼륨으로 분해한다. 볼륨  $V$ 가 다음 조건을 만족할 때,  $V$ 를 솔리드  $S$ 의 최대 볼륨이라고 한다<sup>[17]</sup>.

- ①  $V \subseteq S$
- ②  $V$ 는 오목한 모서리(concave edge)를 가지지 않는다.
- ③  $V$ 의 모든 반공간(halfspace)은  $S$ 의 반공간(halfspace)이다.
- ④ 위의 조건을 만족하는 다른 볼륨  $B$ 에 대해  $B \not\subset V$

MVD에서 솔리드를 MV로 분해하기 위해서는 솔리드의 모든 오목한 모서리를 찾고, 이를 공유하는 면들을 찾아 확장하여 솔리드를 셀(cell)로 분해한다. 그리고 셀들을 최대 볼륨 조건을 만족할 때까지 조합하면 된다. Fig. 9는 MVD를 이용한 볼륨 분해를 보여준다.

### 5. 구현 및 적용

#### 5.1 시스템 구현 및 실험

제안하는 볼륨 분해 방법을 C++ 환경에서 ACIS 형상 모델링 커널과 Hoops3D 가시화 라이브러리, MFC(Microsoft foundation classes)를 이용하여, Fig. 10과 같이 구현하였다. 그림에서 왼쪽의 구성트리는 볼륨 분해 결과를 보여주고, 오른쪽 화면은 분해된 볼륨을 보여준다.

특징형상 인식 테스트 모델로 자주 사용하는

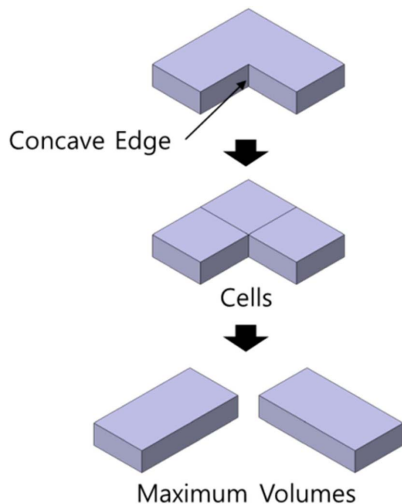


Fig. 9 Maximum volume decomposition

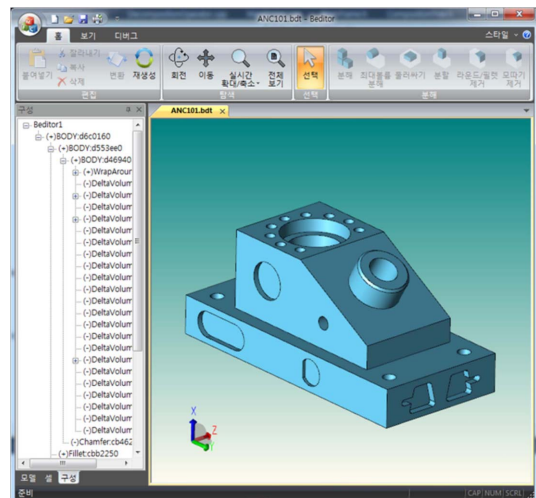


Fig. 10 Prototype system implementation

ANC101 파트에 대해서 본 연구에서 구현한 시스템을 활용하여 단계적 볼륨 분해를 적용하였다. 적용 결과가 Fig. 11이다. Fig. 11(a)는 랩어라운드 연산을 볼륨 분할 연산 이전에 적용한 것이고, Fig.

11(b)는 랩어라운드 연산을 볼륨 분할 연산 이후에 적용한 것이다. 두 결과를 보면, Fig. 11(b)의 경우에 더 많은 볼륨이 생성되었다. 이는 볼륨 분할 연산을 나중에 적용할 경우에는 한 개의 볼륨으로

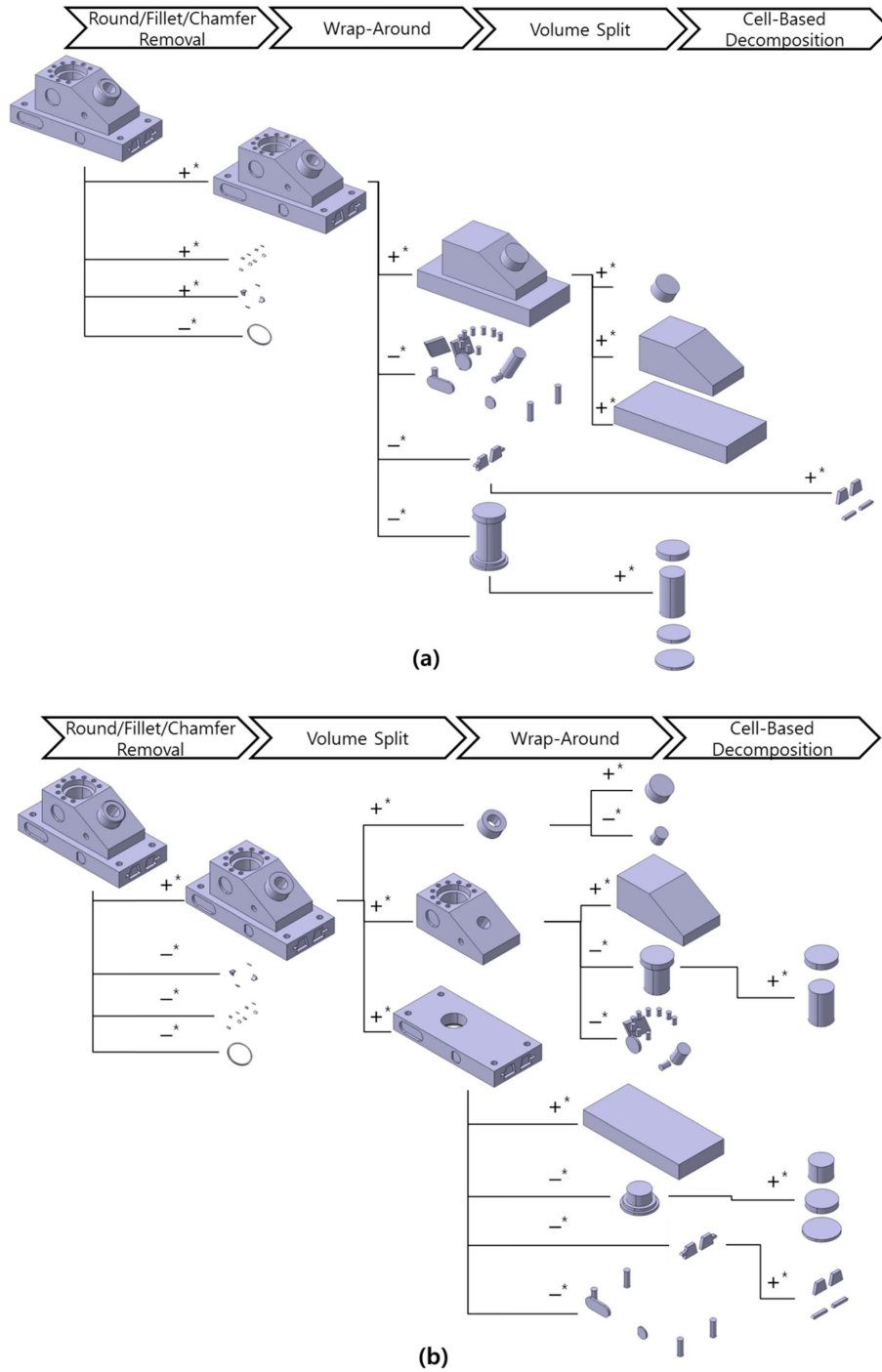


Fig. 11 Test case 1 – ANC101 part



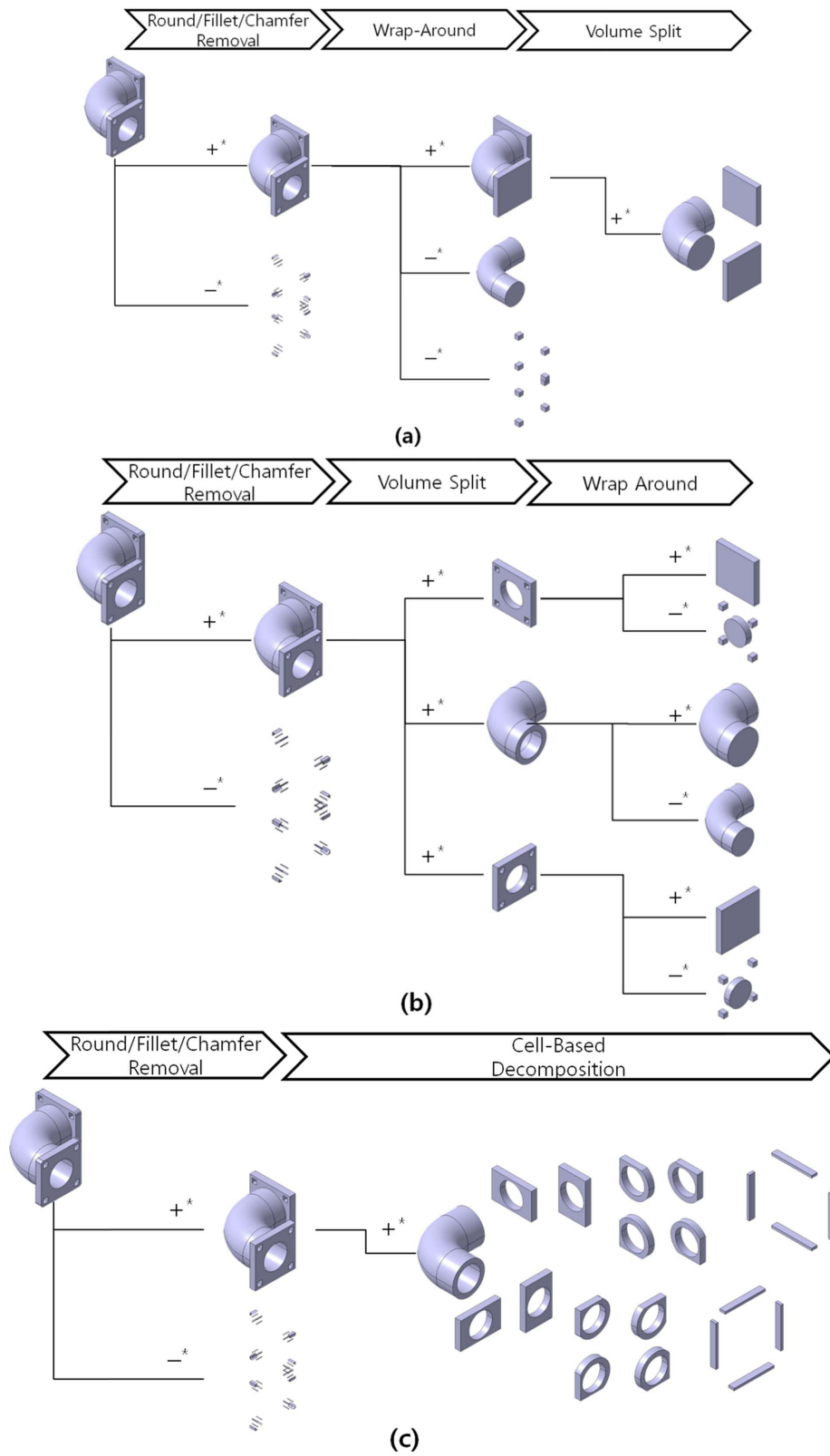


Fig. 12 Test case 2 – elbow part

분할될 수 있는 부분이, 볼륨 분할 연산을 먼저 적용함으로써 여러 개의 볼륨으로 분해되었기 때문이다. 또한 볼륨 분할 연산을 먼저 적용할 경우, Fig. 11(b)에서와 같이, 랩어라운드 연산 적용 후에도 오목한 내부 루프가 남아있을 수 있기 때문에, 볼륨 분할 또는 셀 기반 분해를 추가적으로 적용해야 한다. 구성트리에서 잎 노드에 있는 형상들이 최종적인 볼륨 분해 결과가 된다. 분해된 볼륨들은 필렛(fillet), 모따기(chamfer), 돌출(extrusion) 등의 특징형상으로 인식할 수 있다.

Fig. 12는 파이프의 엘보(elbow)를 본 연구에서 제안한 단계적 볼륨 분해(Fig. 12(a) 및 (b))와 셀 기반 분해(Fig. 12(c))를 이용하여 볼륨을 분해한 결과이다. 셀 기반 분해를 적용할 때에는 라운드와 필렛 제거를 먼저 적용하였다. 이 경우에도 볼륨 분할 연산을 먼저 적용할 경우 더 많은 볼륨이 생성되었다.

### 5.2 볼륨 분해 결과 분석

Fig. 11(a)와 (b), Fig. 12(a)와 (b)의 결과를 보면, 가산적인 볼륨과 감산적인 볼륨이 혼합되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 가산적 볼륨은 형상을 추가하는 특징형상으로 인식할 수 있고, 감산적 볼륨은 형상을 제거하는 특징형상으로 인식할 수 있다. Fig. 12(c)와 같이 셀 기반 분해만 적용했을 경우에는 라운드와 필렛에 해당하는 볼륨을 제외한 모든 볼륨이 가산적인 특성을 가진다. 또한 Fig. 12(c)를 보면 내부 루프가 그대로 남아있는 것을 볼 수 있다. 이는 특징형상 인식 시, 감산적 특징형상으로 인식이 되어야 하는 부분이지만, 셀 기반 분해만으로는 감산적 볼륨을 분해할 수 없다. 가공 특징형상을 인식할 경우에는 피삭재로부터 델타 볼륨(delta volume)을 계산한 뒤, 델타 볼륨을 가산적 볼륨으로 분해하면 되기 때문에 셀 기반 분해의 이와 같은 특징이 문제되지 않지만, 설계 특징형상 인식에 적용할 경우에는 문제가 된다. 이 연구에서는 이를 해결하기 위해 랩어라운드 연산을 적용하였고, 그 결과 Fig. 12(a) 및 (b)와 같이 감산적 볼륨을 분해할 수 있었다.

전체적인 볼륨 분해 시간 중 가장 큰 부분을 차지하는 연산이 셀 기반 분해이다. 그리고 셀 기반 분해 시간은 오목한 모서리(또는 셀)의 수에 영향을 받는다. 따라서 셀 기반 분해 전에 오목한 모서리의 수가 적을수록 전체적인 볼륨 분해 시간이

**Table 1** Change of the edge numbers of two test cases after the wrap-around and split operations

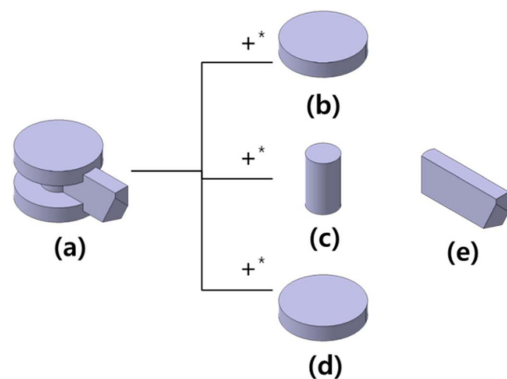
	Before	After
Test case 1	61	5
Test case 2	10	2

감소한다. Table 1은 랩어라운드 및 볼륨 분할 연산을 적용하기 전과 후의 모서리 수를 비교한 표이다. 구현 방법 및 환경, 대상 모델에 따라 볼륨 분해 시간은 달라지지만, 이 표에서 알 수 있는 것처럼 랩어라운드 연산과 볼륨 분할 연산을 적용하면 오목한 모서리 수를 크게 줄일 수 있어 결과적으로 전체적인 볼륨 분해 시간이 줄어드는 효과를 얻을 수 있다.

### 5.3 설계 특징형상 인식을 위한 향후 연구 방향

본 연구에서 제안하는 방법은 마지막 단계에서 셀 기반 분해를 한다. 그 결과 오목한 모서리가 없는 볼록한 형상의 단순 볼륨들로 분해된다. 그러나 단순 볼륨들 간에 서로 교차하는 부분이 생기게 되고, 이로 인해 단순 볼륨의 경계가 특징형상 인식에 적합하지 않게 되는 경우들이 있다. 또한 경계가 복잡하더라도 형상이 볼록하면 더 이상 분해할 수 없다. Fig. 13(e)를 예로 들면, 형상은 단순하지만 왼쪽 경계는 원통형 곡면의 일부 형상이고 오른쪽 경계는 두 개의 경사진 면으로 구성되어 있다. 이 경우에는 설계 특징형상으로 인식하기 어렵다. 따라서 이와 같은 경우를 처리하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

Fig. 13(b)-(d)의 경우에는 직선돌출 특징형상과 회전돌출 특징형상으로 모두 인식 가능하다. 또한 한 개의 볼륨으로 합칠 경우 회전돌출 특징형상으



**Fig. 13** Maximum volume decomposition

로 인식할 수 있다. 이처럼 다양한 특징형상으로 인식 가능한 경우, 이를 처리하기 위한 연구가 필요하다.

볼륨들이 특징형상으로 인식 가능한 경우에는 볼륨으로부터 특징형상의 파라미터를 찾아내기 위한 방법도 필요하다. 예를 들어, Fig. 13(b)의 경우, 직선돌출 특징형상으로 인식한다면, 형상으로부터 스케치 단면과 돌출 방향 및 돌출 길이를 찾아내야 특징형상 인식이 완료된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 설계 특징형상 인식을 고려한 단계적 볼륨 분해 절차를 제안하고 세부 단계별 분해 기법을 논의하였다. 그리고 구현한 프로토타입 시스템을 활용하여 ANC101 파트와 파이프 엘보에 대한 볼륨 분해 실험을 하였다. 실험 결과, 제안하는 볼륨 분해 방법이 셀 기반 분해보다 분해 속도가 빠르고, 컨벡스 분해가 처리할 수 없는 2차곡면까지 처리할 수 있으며, 가산적 형태와 감산적 형태를 갖는 볼륨을 생성할 수 있다는 것을 확인하였다.

단계적 볼륨 분해를 통해 얻은 볼륨들은 설계 특징형상으로 인식된다. 그러나 볼륨 중 일부는 설계 특징형상으로 바로 인식하기 어렵다. 그리고, 설계 의도를 고려하면, 일부 볼륨들은 조합을 한 후 설계 특징형상으로 인식할 필요가 있다. 마지막으로 특징형상을 수정할 수 있도록, 인식된 특징형상으로부터 파라미터를 추출하기 위한 방법도 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

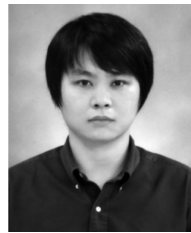
- Pratt, M. J., Anderson, B. D. and Ranger, T., 2005, Towards the Standardized Exchange of Parameterized Feature-Based CAD Models, *Computer-Aided Design*, 37(12), pp. 1251-1265.
- Mun, D. W. and Han, S. H., 2001, Exchange of CAD Models Using Macro Parametric Approach, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 6(4), pp. 254-262.
- Mun, D. W., Kim, B. and Han, S. H., 2002, A Hybrid Parametric Translator Using the Feature Tree and the Macro File, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 7(4), pp. 240-247.
- Choi, G., Mun, D. and Han, S., 2002, Exchange of CAD Part Models Based on the Macro-Parametric Approach, *International Journal of CAD/CAM*, 2(1), pp. 13-21.
- Mun, D., Han, S., Kim, J. and Oh, Y., 2003, A Set of Standard Modeling Commands for the History-Based Parametric Approach, *Computer-Aided Design*, 35(13), pp. 1171-1179.
- Rappoport, A., 2003, An Architecture for Universal CAD Data Exchange, *Proceedings of ACM Symposium on Solid Modeling and Applications 2003*, Seattle, WA, USA, pp. 266-269.
- Joshi, S. and Chang, T. C., 1988, Graph Based Heuristics for Recognition of Machined Features from a 3-D Solid Model, *Computer-Aided Design*, 20(2), pp. 58-66.
- Chuang, S. H. and Henderson, M. R., 1990, Three-dimensional Shape Pattern Recognition Using Vertex Classification and the Vertex-edge Graph, *Computer Aided Design*, 22(6), pp. 377-387.
- Gavankar, P. and Henderson, M. R., 1990, Graph-based Extraction of Protrusions and Depressions from Boundary Representations, *Computer Aided Design*, 22(7), pp. 442-450.
- Sormaz, N., Clark, D. E. R., Corney, J. R. and Tuttle, J. R., 1996, A Feature Recognition Algorithm for NC-Machining, *Proceedings of 5th IFIP WG 5.2 Workshop*, Airlie, VA, USA, pp. 223-233.
- Vadenbrande, J. H. and Requicha, A. A. G., 1993, Spatial Reasoning for the Automatic Recognition of Machinable Features in Solid Models, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(12), pp. 1269-1285.
- Tang, K. and Woo, T., 1991, Algorithmic Aspects of Alternating Sum of Volumes. Part I: Data Structure and Difference Operation, *Computer-Aided Design*, 23(5), pp. 357-366.
- Kim, Y. S., 1992, Recognition of Form Features Using Convex Decomposition, *Computer-Aided Design*, 24(9), pp. 461-476.
- Sakurai, H. and Dave, P., 1996, Volume Decomposition and Feature Recognition, Part II: Curved Objects, *Computer-Aided Design*, 28(6-7), pp. 519-537.
- Woo, Y., 2003, Fast Cell-Based Decomposition and Applications to Solid Modeling, *Computer-*

- Aided Design*, 35(11), pp. 969-977.
16. Woo, Y. and Lee, S. H., 2006, Volumetric Modification of Solid CAD Models Independent of Design Features, *Advances in Engineering Software*, 37(12), pp. 826-835.
  17. Woo, Y., 2008, Modification of Solid Models Independent of Design Features, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 13(2), pp. 131-138.
  18. Woo, Y. and Kang, W., 2011, Editing Depression Features in Static CAD Models Using Selective Volume Decomposition, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 16(3), pp. 178-186.
  19. Kim, J. H. and Park, J. W., 2007, Reference Feature Based Cell Decomposition and Form Feature Recognition, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 12(4), pp. 245-254.
  20. Kim, I. and Han, S., 2012, Generation of Design History from B-Rep Models by Mapping and Sequencing of Design Features, *Advanced Science Letters*, 10(1), pp. 528-532.
  21. Zhu, H. and Meng, C. H., 2001, B-Rep Model Simplification by Automatic Fillet/Round Suppressing for Efficient Automatic Feature Recognition, *Computer-Aided Design*, 34(2), pp. 109-123.
  22. Koo, S. and Lee, K., 2002, Wrap-Around Operation to Make Multi-Resolution Model of Part and Assembly, *Computers & Graphics*, 26(5), pp. 687-700.
  23. Kim, Y. S. and Wilde, D. J., 1992, A Convergent Convex Decomposition of Polyhedral Objects, *Journal of Mechanical Design*, 114(3), pp. 468-476.



### 김 병 철

2001년 고려대학교 기계공학과 학사  
 2003년 한국과학기술원 기계공학과 석사  
 2008년 한국과학기술원 기계공학과 박사  
 2008년 (주)부품디비 책임연구원  
 2009년~2012년 삼성중공업 산업기술연구소 책임연구원  
 2012년~현재 동아대학교 기계공학과 조교수  
 관심분야: Feature-based and parametric design, CAD data exchange, geometric modeling



### 김 익 준

2007년 한양대학교 기계공학과 학사  
 2009년 한국과학기술원 기계공학과 석사  
 2009년~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정  
 관심분야: Computer-aided design, CAD data exchange



### 한 순 흥

카이스트 기계항공시스템공학부의 교수이며, 2008년부터 해양시스템 공학과 학과장을 맡고 있다. 2001년~2002년에 캐드캠학회의 부회장을 맡았으며, 2001년~2004년에 웹저널인 International Journal of CAD/CAM의 편집장으로 활동하였다. 2001년~2003년과 현재 STEP 센터(www.kstep.or.kr)의 회장, 2003년에 전자거래학회의 회장을 맡았으며, 관심 분야는 STEP표준, 가상현실 응용, 지능형 CAD이다. 홈페이지 <http://icad.kaist.ac.kr>, 미국 미시건 대학에서 1990년 박사학위



### 문 두 환

1999년 고려대학교 기계공학과 학사  
 2001년 한국과학기술원 기계공학과 석사  
 2006년 한국과학기술원 기계공학과 박사  
 2006년~2010년 한국해양연구원 선임연구원  
 2010년~현재 경북대학교 정밀기계공학과 조교수  
 관심분야: Computer-aided design, Industrial data standards for product data exchange, Product lifecycle management, Knowledge-based engineering, VR for Engineering Applications