

기계부품의 형상검색을 위한 유사성 평가방법†

김철영*, 김영호**, 강석호***

Similarity Assessment for Geometric Query on Mechanical Parts

Kim, C.-Y.*, Kim, Y.-H.** and Kang, S.-H.***

ABSTRACT

CAD databases are the core element to the management of product information. A key to the successful use of the databases is a rational method of query to and retrieval from the databases. Although it is parts geometry that users eager to retrieve from the CAD databases, no system yet supports geometry-based query. This paper aims at developing a new method of assessing geometric similarity which can serve as the basis of geometric query for CAD database. The proposed method uses ASVP (Alternating Sums of Volumes with Partitioning) decomposition that is a volumetric representation of a part obtained from its boundary representation. A measure of geometric similarity between two solid models is defined on their ASVP tree representations. The measure can take into account overall shapes of parts, shapes of features and their locations. Several properties that a similarity measure needs to satisfy are discussed. The geometric query developed in this paper can be used in a wide range of applications using CAD databases, which include similarity-based design retrieval, variant process planning, and components selection from part library. An experiment has been carried out to demonstrate the effectiveness of the method, and the results are presented.

Key words : Geometric Query, Similarity, Feature, ASVP

1. 서 론

제품 개발에 있어 기존의 설계를 이용할 수 있다면, 설계 비용 감소와 설계 기간 단축과 같은 효과를 얻을 수 있다. 따라서 부품 라이브러리 구축 및 이를 통한 설계 재사용은 매우 중요한 문제이며, 이때 부품의 효과적 검색이 그 핵심 기술이다. 신제품 개발 빈도가 증가하면서 새로이 설계되는 부품의 수도 따라서 증가하고, 이는 기존의 설계를 재사용하기 위한 검색을 어렵게 한다.

이 논문은 부품 형상에 대한 검색 기술을 다룬다. 부품은 여러 가지 속성으로 정의될 수 있는데, 부품의 속성으로는 형태, 특징형상, 기능, 크기, 공차, 표면처리, 재료의 종류와 특성, 원자재 등이 있다¹⁾. 이

중 직접 형상에 관련된 것으로는 형태, 특징형상, 크기 등이 있으며, 공차, 표면처리, 원자재 형태 등과 같은 속성들은 형상에 대해서 정의되므로 부품형상과 간접적으로 관련된다. 따라서 형상은 부품을 결정짓는 가장 중요한 속성이며, 형상을 이용한 검색이 부품 검색의 주요 방법이 되어야 한다.

부품 분류와 검색 방법으로 지금까지는 주로 GT (Group Technology) 기법이나 이와 유사한 방법이 이용되어 왔다. GT 방법은 정해진 길이의 코드를 이용하는데, 이 코드는 부품의 형상과 여러 가지 부품 속성을 표현할 수 있도록 설계된 것이다. 그러나 GT 코드체계는 새로운 부품의 추가와 같은 동적인 변화에 대응하기 힘들고, 완전히 자동적인 코딩방법이 존재하지 않아서 인간이 도면을 판독하여 코딩하는 것이 필요하다는 단점이 있다. GT 방법에서 효율적인 코딩 방법이 없다는 것이 이의 실제 적용에 있어 가장 큰 걸림돌이었다.

*정회원, LG-EDS시스템 CALS & CIM연구소

**중신회원, 서울대학교 산업공학과

***서울대학교 산업공학과

형상검색은 주로 화상(image) 처리 분야에서 연구되어왔다. 화상 데이터베이스에서 유사한 화상을 추출하기 위하여, 2차원 윤곽선(contour)을 추출하고 이 윤곽선의 특징을 다차원 벡터로 표현한 특징 벡터(feature vector)의 거리로 정의되는 유사성을 이용하는 방법이 사용되고 있다¹⁾.

Berchtold와 Kriegel²⁾는 윤곽선을 이용하여 자동차 내부의 전선을 묶는 클립을 검색하는 방법을 제안하였다. 그러나 일반적인 기계 부품의 경우, 2차원 외곽선만으로는 그 특성을 표현하기 어려우며, 애매모호함(unambiguity)이 없는 솔리드 모델에 대해서 검색이 이루어지는 것이 바람직하다. Sun과 Wysk³⁾ 등은 Faceted B-rep 모델에 대해서 면(face)의 넓이와 인접한 면과의 각도를 표현한 그래프를 이용하여 유사성을 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 이 방법은 후술하는 유사성의 기본 특성인 대칭성(symmetry)을 보장하지 못하여, 같은 검색 조건이라도 이를 기술하는 순서에 따라 결과가 다를 수 있다. Elinson과 Regli⁴⁾는 특징형상 추출(feature extraction) 방법을 사용하여, 특징형상의 종류와 특징형상간 상호 작용(interaction)을 그래프로 표현하고, 몇 가지 규칙을 통하여 이를 점차 축약된 형태로 변형하면서 비교하는 이산적(discrete) 유사성 평가 방안을 제안하였다. 그러나 일반적인 축약 규칙을 제시하지 못했으며, 또 계산부담도가 매우 높은 그래프 동치 문제(graph isomorphism problem)에 의존하는 단점이 있다.

이 논문에서는 기계 부품의 형상검색에 사용될 수 있는 형상유사성을 새로 정의하고, 이를 효율적으로 평가하는 방법을 제시한다. 개발한 방법은 3차원 B-rep 솔리드 모델에 대하여 개략형상과 특징형상과 같은 기계 부품의 형상적인 특성을 표현할 수 있는 ASVP⁵⁾ 트리를 이용한다.

2. 부품 형상검색과 형상유사성

먼저 부품 형상검색의 개념을 정의한다. 2.1절에서는 형상검색의 일반적 정의를 알아보고, 2.2절은 형상유사성 척도가 만족해야 하는 기본적 성질을 다루며, 2.3절에서는 형상검색에서 반영되어야 하는 형상의 특성에 대해서 살펴보기로 한다.

2.1 형상검색의 정의

검색이란 주어진 조건과 일치하는 대상을 찾는 것이다. 형상검색은 검색조건으로 형상 속성을 사용하는 것을 말한다. 부품의 형상은 주로 특징형상과 같

은 기능적인 형상요소로 표현되지만 정확한 형상의 묘사를 위해서는 부품의 개략적인 형태와 각 형상요소의 형태와 위치가 결정되어야 한다.

형상속성은 명시적으로 정의하기 어려우므로 검색 조건이 일치하는 대상을 찾는 일반적인 검색방법과 달리 형상검색은 유사한 형상을 가진 대상을 찾는 방법이 될 것이다. 즉, 형상을 이용한 부품검색은 형태가 비슷하다든지 혹은 특징형상의 종류와 배열이 비슷한 경우를 추출하는 것을 말하고, 이를 유사성 검색이라고 한다.

형상검색을 다음과 같은 질의문으로 표현할 수 있다. 이는 관계형 데이터베이스의 표준 검색어인 SQL 문법을 따라 작성한 선택(select) 질의문으로, similar_in_shape(x, y)는 두 형상 x, y의 유사성이 일정 수준 이상인 경우에 참이 되는 명제함수(predicate)이다.

선택검색

```
SELECT y FROM parts
WHERE similar_in_shape(x, y)
```

이 선택검색을 구현하기 위해 먼저 형상유사성 함수를 도입하여야 한다. 이 논문에서는 두 형상 x, y의 유사성을 나타내는 유사성 함수 $\delta(x, y)$ 를 정의하여 사용한다. 유사성함수를 이용하면 선택검색은 다음과 같이 정의된다.

For a given reference shape x , similarity function δ , and threshold t , find the set of all parts, Y , such that $\forall y \in Y, \delta(x, y) > t$.

이 정의를 살펴보면, 형상검색에서 부품간 형상유사성의 평가가 가장 기본적인 작업임을 알 수 있다. 이 논문에서는 기계 부품에 적합한 형상유사성의 정의와 형상유사성의 평가 방법을 개발하였다. 형상의 유사성을 정의하고 평가하는 방법에 대해서는 4장과 5장에서 설명한다.

2.2 유사성의 기본 성질

여러 가지 유사성 척도를 정의할 수 있지만, 유용한 유사성 척도로서 만족해야 하는 기본적인 성질이 있다. 본 연구에서는 비교의 편의상 유사성 척도 δ 의 값을 [0,1] 사이의 값으로 사용하며, 완전한 유사성에 대해서 1의 값을 갖도록 하고, 유사성이 적을수록 0에 가까운 값을 가지도록 유사성 척도를 정의하였다. 이런 유사성 척도 δ 에 대해서 1)과 같은 경

계조건(boundary condition)을 설정할 수 있다. 또한 유사성 척도는 2)와 같은 대칭성(symmetry)을 가져야 한다. 이 두 가지 성질은 모든 유사성 척도가 만족해야 하는 일반적 성질이다. 한편, 3)과 같은 삼각 부등식(triangle inequality) 관계를 생각할 수 있는데, 이는 효율적인 유사성 검색을 위한 색인구조에 이용될 수 있다[12].

- 1) 경계 조건 : $\delta(x, x) = 1, \delta(x, h) = 0$
- 2) 대칭성 : $\delta(x, y) = \delta(y, x)$
- 3) 삼각 부등식 관계 : $[1-\delta(x, y)] + [1-\delta(y, z)] \geq [1-\delta(x, z)]$

형상에 대한 유사성을 비교할 때, 형상의 위치(location), 자세(orientation), 크기(scale)에 상관없이 유사성을 측정할 수 있어야 할 것이다. 유사성이 형상의 위치, 자세, 크기와 무관하게 측정될 수 있는 성질을 불변(invariant)성질이라고 한다. 보통 아래 세 가지 변환에 대한 불변성질이 고려된다.

- Translational invariance: 모든 평행이동 변환의 집합에 대한 불변성
- Scaling invariance: 모든 축소/확대 변환의 집합에 대한 불변성
- Rotational invariance: 모든 회전 변환의 집합에 대한 불변성

불변성질을 만족할 수 있는 여러 가지 방법이 있겠으나 두 형상의 유사성이 최대가 되도록 한 쪽의 형상을 적절히 변환한 후에 유사성을 측정하는 방법이 합리적이라고 할 수 있다.

그러나, 일반적으로 3차원의 형상에 대해서 유사성이 최대가 되도록 변환하거나 불변의 특징을 추출하기가 매우 어렵다¹⁾. 또한 현실적으로도 불변의 성질은 다분히 응용에 따라 다르게 적용될 수 있다. 예를 들어, 기계 부품의 경우, 부품의 크기에 대한 차이를 형상의 유사성에 고려할 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 즉, scaling invariance를 고려하는 것은 응용의 요구에 따라 달라질 수 있다. 또한 일반적인 설계 관습을 고려할 때, rotational invariance 성질은 연속적인 회전 변환에 대한 것이라기보다, 정면(front)-평면(top)-우측면(right)을 설정하는 이산적인 회전 변환만을 고려하는 것으로도 충분하다.

그러므로 이 논문에서 불변성질은 다음과 같이 제한적으로 고려하기로 한다. 즉, translational invariance와 scaling invariance는 전체 형상의 근사 모형에 대해서만 고려하며, rotational invariance는 정면-평

면-우측면을 설정하는 24가지 경우에 대해서만 고려하기로 한다.

2.3 개략형상과 특징형상

유사성은 다분히 검색자의 주관적인 측면을 가지며, 실제로 부품을 검색할 때도 부품 기능 명세, 가공 계획 등 검색자가 염두에 두고 있는 응용 영역에 따라 요구되는 형상의 특성은 다르게 설정되는 것이 일반적이다. 실제로 가공 계획, 설계 추출(design retrieval) 등 다양한 응용에서 적용되어온 GT 분류 방법(classification method)에는 여러 가지 코드가 존재하는데, 이들을 살펴보면 위에서 설명한 점이 고려되어 있다는 것을 알 수 있다.

GT 코드 중에서 비교적 범용성을 인정 받고있는 코드로는 오피츠(Opitz) 코드, DCLASS와 같은 계층적 코드가 있으며²⁾, 이 분류방법에서 공통적인 요소는 대략적인 전체 형상, 전체 형상에 대한 변형, 그리고 이 각각에 대해서 특징형상과 그 관계별로 코드를 구성하게 되어 있다는 점이다. 이를 토대로 기계부품의 형상유사성을 다음과 같은 개략형상과 특징형상으로 나누어 고려하기로 한다.

- 1) 개략형상: 대략적인 부품의 형태
- 2) 특징형상: 특징형상의 종류, 방향, 관계

개략형상은 주로 부품의 전체적인 외형을 말하며, 형태적인 측면이 관심의 대상이 된다. 특징형상은 부품의 기능에 직접적인 관련이 있는 형상의 한 부분이다. 특징형상은 응용에 따라 여러 가지 분류방법이 존재하지만, 응용에 무관하게 형태와 접근방향과 같은 기하학적인 특성에 따른 분류를 할 수 있다³⁾. 또한 특징형상에 대해서 크기와 인접 관계와 같은 형상적인 속성을 고려할 수 있다.

Fig. 1에 두 부품에 대한 특징형상과 개략형상이 각각 (a)와 (b)에 나타나 있다. 개략형상은 다소 모호한 개념이지만, 대체로 모재(stock)에서 부품의 외형을 변형하는 특징형상이 적용된 형태라고 볼 수 있다. Fig. 1의 부품 A에서 스텝 특징형상이 여기에 해당된다. 이 논문에서 사용하는 개략형상과 특징형상의 구체적 의미는 참고문헌 [12]에 정의되어 있다.

이 연구에서는 형상의 비교를 위해 응용에 상관없이 순수하게 형상에 기반한 특징형상을 반영한다. 이를 위해 특징형상과 개략형상을 고려할 수 있는 ASVP(Alternating Sums of Volumes with Partitioning) 트리⁴⁾를 이용하였다. ASVP 트리에 대해서는 다음 절에 설명하였다.

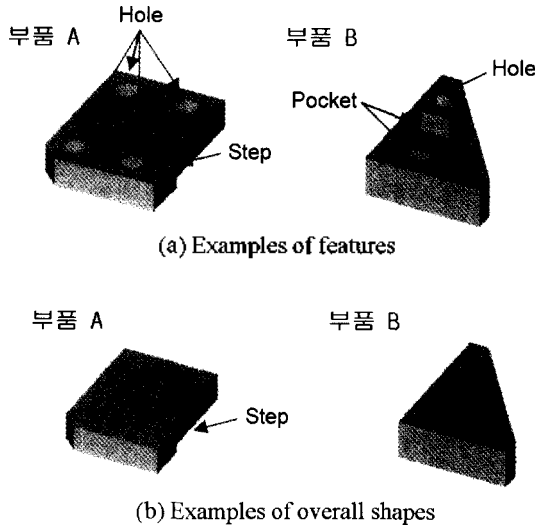


Fig. 1. Examples of overall shapes and features.

3. ASVP 볼록 분해 방법

이 절에서는 ASVP 분해 방법¹⁾과, ASVP 트리 구조의 특징을 살펴보기로 한다. 이 방법은 주어진 형상을 볼록 분해(convex decomposition)한 ASVP 트리를 이용하여 원래 형상을 표현한다. 또, ASVP 트리에서 상·하위 요소를 적절히 가감하여 특징형상 요소의 구조인 FFD(Form Feature Decomposition) 트리를 구하고, 각 특징형상 요소를 분류함으로써 특징형상을 추출할 수 있다. FFD 트리는 형상에 기초를 둔 특정 응용에 중립적인 특징형상의 계층적 구조이며, ASVP 트리는 특징형상을 반영한 형상의 근사모형이 된다.

3.1 ASVP 분해 방법

ASVP 분해 방법은 형상을 계층적인 볼록 입체(convex volume)로 근사하는 방법이다. ASVP 분해 과정의 각 단계에서는 다음 식 (1)과 같이 형상 P를 볼록-껍질 $CH(P)$ 와 볼록-껍질에서 원래 형상을 뺀 차이인 $CHD(P)$ 로 분해한다. $CH(P)$ 는 ASVP 트리의 요소로 유지되며, $CHD(P)$ 는 공간적인 연결성에 따라 분리되어, 각각에 대해서 다시 분해 과정을 거치게 된다.

$$P = CH(P) - *CHD(P) \tag{1}$$

ASVP 분해 과정은 $CHD(\cdot)$ 모형을 공집합이 될 때까지 반복하게 된다. 이 과정에서 트리가 수렴하

지 않는 경우가 발생할 수 있는데, 이 때는 절단(partitioning)을 통해서 수렴하지 않는 요소 $CHD(P)$ 를 적절히 분할하게 된다.

부품의 특징형상은 ASVP 트리를 이용하여 발견할 수 있다. 부품 형상의 면에서 최초의 볼록-껍질에 포함되지 않은 면들이 트리의 하위 요소에 나타나게 되는데, 인접한 두 개 이상의 면들이 특징형상을 이루며, 이는 적절한 상,하위의 볼록 입체를 조합(ISC: Immediate Super-component Combination)하여 찾을 수 있다. 이렇게 ASVP 트리를 변형한 것이 FFD 트리이며, FFD 트리의 각 요소는 접근방향에 따라 특징형상의 종류가 결정된다.

다음 Fig. 2에 ASVP 트리와 FFD 트리의 예가 나타나 있다. 그림에서는 인접한 두 개의 ASVP 요소에 대한 ISC로 스텝 특징형상을 추출하였다.

3.2 ASVP 트리의 성질

볼록-껍질(convex hull) 모형, $CH(\cdot)$ 는 주어진 형상을 포함하는 볼록한(convex) 성질을 가진 최소의 형상이다. ASVP 분해 과정의 각 단계는 형상 P를 근사(approximation)모형 $CH(P)$ 와 오차(error)모형 $CHD(P)$ 로 분해하는 것이다.

ASVP 분해 과정은 이와 같이 근사모형과 오차모형으로 분해하는 과정을 재귀적으로 반복하는 것이다. ASVP 분해과정을 통하여 생성된 ASVP 트리 역시 재귀적인 구조를 가진다. 즉, 부모 노드가 근사모형이라고 하면, 자손 노드로 이루어진 하위의 부분 트리는 오차모형에 대한 ASVP 트리가 된다.

ASVP 트리의 또 다른 특징으로는 각 요소가 볼록합(convex)을 들 수 있다. 그리고 ASVP 트리는 부모 노드의 입체(volume)에 자손 노드의 입체가 항상 포함되는 계층적인 구조이다.

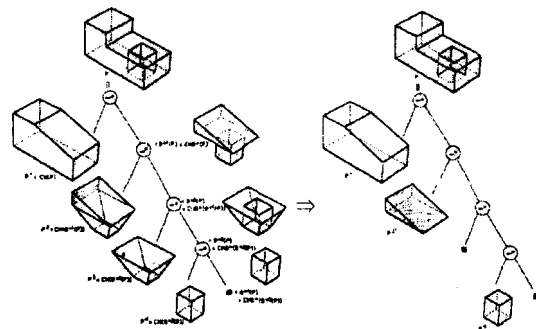


Fig. 2. Examples of ASVP and FFD¹⁾.

4. ASVP 요소 간의 유사성 평가

이 논문에서는 제시하는 부품의 형상유사성은 두 형상에 대한 ASVP 트리의 각 요소 간 유사성을 트리 구조에 따라 적절히 가중치를 주어서 합한 값으로 정의한다. ASVP 요소간 유사성은 요소간의 형태 유사성과 위치관계에 대한 유사성의 가중합으로 정의된다.

4.1 ASVP 요소간 유사성

4.1.1 요소형상의 표현

ASVP 트리의 각 요소는 유한한 볼록 다면체 (bounded convex polyhedron)이다. 이 다면체 K 내부에 존재하는 한 점에서 이를 중심으로 하는 단위 구(unit sphere) S 상의 임의의 벡터 u 의 방향으로 볼록 집합의 경계면까지 거리를 다음과 같은 함수 h 로 정의할 수 있다.

$$h(u) = \supremum \{c | cu \in K, u \in S\}$$

Fig. 3에 2차원 볼록 다면체에 대한 이 내용의 예가 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 원점에서 u 방향의 반직선과 볼록 다면체의 면(이 경우에는 선분)은 항상 한 점에서 만나며, 평면까지의 거리는 원점에서 교점까지의 거리가 된다. 아울러 2차원에서는 단위원상의 벡터를 x 축과 이루는 각도로 표현할 수 있으므로, 함수 h 를 $[0, 2\pi]$ 에서 정의되는 함수로 표현할 수 있다.

이 함수 h 는 볼록 집합의 경계면까지의 거리 함수이며, 볼록 집합의 형태를 완전히 묘사한다. 두 볼록 집합의 형태를 비교하기 위해서는 경계면까지의 거리가 측정되는 원점이 설정되어야 한다. 즉, 각 볼록 집합을 대표할 수 있는 점을 원점으로 설정하여 경

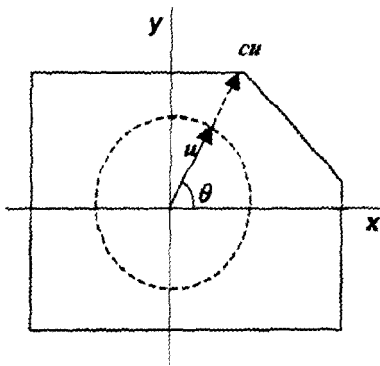


Fig. 3. Distance function for bounded convex polygon.

계면까지의 거리함수를 구하고, 이를 비교하여야 한다. 이 논문에서는 대표점으로 무게중심을 사용한다.

4.1.2 요소간 형태유사성

형태유사성은 다음에 고려할 요소의 위치를 배제하고 유사성을 측정할 것을 말한다. 경계면까지의 거리함수에 대해서 직접 유사성을 정의하는 것이 어려우므로, 이 함수의 표본을 추출하여 이를 이용하여 유사성을 평가한다. 3차원상에서 단위 벡터는 x, y 축과 이루는 두 각도로 표현될 수 있으므로, 단위구를 등각도로 분할하여 경계면까지 거리함수의 표본을 다음과 같이 $n \times n$ 행렬로 표현할 수 있다.

$$G = [g_{ij}], 1 \leq i, j \leq n$$

$$g_{ij} = h\left(2\pi \cdot \frac{i-1}{n}, 2\pi \cdot \frac{j-1}{n}\right), 1 \leq i, j \leq n \quad (2)$$

실제로 형상 비교에는 다음과 같이 정규화된 표본 행렬을 사용한다. 이는 0과 1사이의 유사성을 얻기 위해서이다.

$$G' = G/|G|, |G| = \sqrt{\sum_i \sum_j g_{ij}^2} \quad (3)$$

식 (3)에서는 형상의 크기와 관련이 있으므로 정규화된 두 행렬에 대한 비교는 크기에 대한 효과를 배제하고 비교하는 결과가 된다. 두 볼록한 ASVP 요소 C_1, C_2 의 형태에 대한 유사성 $\delta_{cs}(C_1, C_2)$ 은 각 ASVP 요소의 정규화된 표본 행렬 $G'_1 = [g'_{1,ij}], G'_2 = [g'_{2,ij}]$ 간의 거리 척도로서 다음 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_{cs}(C_1, C_2) &= 1 - \frac{\text{trace}\{(G'_1 - G'_2)^T \cdot (G'_1 - G'_2)\}}{2} \\ &= \sum_{ij} (g'_{1,ij} \cdot g'_{2,ij}) \end{aligned} \quad (4)$$

4.2 요소간 형상유사성과 불변성

ASVP 트리의 요소에 대한 형상유사성은 형태와 더불어 전체 부품에 대한 위치를 고려한다. 즉 부품의 어떤 위치에 어떤 형태의 수정이 가해졌는지를 고려해서 유사성을 평가하는 것이다.

ASVP 트리에서 첫번째 요소, 즉 루트 노드에 해당하는 요소는 전체 형상을 포함하는 볼록 집합이 되며, 그 나머지 ASVP 트리 요소는 전체 형상의 일부분만을 포함하게 된다. 따라서 첫번째 요소의 경우 형태만을 고려하게 되므로, 4.1.2항에서 정의한 $\delta_{cs}(C_1, C_2)$ 를 사용하여 유사성을 측정한다. 하위의 요소 C_i, C_j 에 대해서는 전체 부품에서 위치가 고려되어야 하므로 위치를 고려한 유사성 $\delta_c(C_i, C_j)$ 를 정의

하여야 한다.

위치의 경우는 중심점을 기준으로 상위의 요소에서 각 요소에 이르는 벡터를 사용하여 측정할 수 있다. 즉, 각각의 상위 요소의 중심점에서 형상유사성이 측정되는 두 ASVP 요소 C_1, C_2 의 중심점에 이르는 방향의 단위 벡터를 각각 \hat{l}_1, \hat{l}_2 라고 하면, 두 ASVP 요소 C_1, C_2 간의 형상유사성 $\delta_c(C_1, C_2)$ 는 다음 식 (5)와 같이 위치와 형태에 관련된 유사성의 가중합으로 정의될 수 있다. 위치와 형태에 관련된 상대적 가중치는 각각 w_l, w_s ($w_l + w_s = 1$)로 정해질 수 있다.

$$\delta_c(G_1, G_2) = w_l \cdot \frac{1 + \hat{l}_1 \cdot \hat{l}_2}{2} + w_s \cdot \delta_{cs}(G_1, G_2) \quad (5)$$

이와 같은 유사성 평가 방식은 ASVP 트리의 루트 요소를 이용하여 전체 형상의 크기와 위치를 추정하고, 이를 기준으로 부품의 크기와 위치에 관련된 불변성을 제공하는 것이다. 루트 요소의 형상유사성은 크기와 위치가 동일하게 변환된 다음 비교하는 것이므로, 형태의 비교만이 이루어지는 것이며, 하위의 요소 간 유사성에는 형태와 더불어 상위요소에 대한 상대적 위치를 고려하여 결국 전체 부품에 대한 요소의 위치를 고려하게 되는 것이다. 회전변환에 대한 불변성(rotational invariance)을 제공하기 위해서 각 요소들에 대해 정면, 평면, 우측면을 설정하는 24가지 회전변환을 적용하여 전체 형상유사성을 평가하여 유사성 값의 최대치를 유사성으로 적용한다.

5. ASVP 형상유사성

이제 3장의 ASVP 트리와 4장의 ASVP 요소 형상유사성을 이용한 형상유사성의 정의와 평가 방법에 대해서 살펴보기로 한다.

5.1 형상유사성의 정의

ASVP 트리의 재귀적인 성질을 이용하여 두 형상의 유사성을 다음 [정의 1]과 같이 정의할 수 있다.

[정의 1] 두 형상 A, B 의 형상유사성 $\delta(A, B)$ 는 ASVP 트리를 이용한 유사성 $\delta_{ASVP}(A, B)$ 이며, 이는 ASVP 트리의 재귀적인 구조와 ASVP 노드가 표현하는 요소형상 간의 유사성 $\delta_c(A, B)$ 를 이용하여 아래와 같이 정의된다.

$$\delta(A, B) = \delta_{ASVP}(A, B) \quad (6)$$

$$\delta_{ASVP}(A_j, B_k) = \delta_c(A_j, B_k) - \frac{q \delta_c(A_j, B_k)}{\max(n_A, n_B)}$$

$$\min_{VM} \sum_{(m, n) \in M} [1 - \delta_{ASVP}(A_m^{i+1}, B_n^{i+1})], 1 \leq i \leq d-1 \quad (7)$$

단, $i = 1$ 일 때, (7)식의 $\delta_c(\cdot, \cdot)$ 는 $\delta_{cs}(\cdot, \cdot)$.

여기서 d 는 두 ASVP 트리의 깊이를 나타내며, A_j, B_k 는 ASVP 트리의 i 번째 단계의 노드를 나타내고, $\delta_{ASVP}(A_j, B_k)$ 는 A_j, B_k 를 각각 루트 노드로 하는 두 개의 하위 ASVP 트리 간의 형상유사성이다. 또, n_A 와 n_B 는 각각 A_j, B_k 의 자식 노드의 수이며, 이 때 A_j, B_k 는 각각 n_A 와 n_B 개의 하위 부분트리를 가진다. q 는 단계간의 상대적인 비중을 나타내는 가중치이다. M 은 A_j, B_k 노드의 하위 부분트리간의 짝짓기 방법을 나타내는 집합이며, 이 집합의 한 원소인 (m, n) 은 각각 A_j, B_k 노드의 자식 노드인 A_m^{i+1}, B_n^{i+1} 를 루트노드로 하는 하위 부분 트리가 짝지어진 경우를 뜻한다.

식 (7)은 앞에서 언급한 재귀적 ASVP 트리 구조와 ASVP 분해 과정을 표현한 식 (1)을 고려하여 만들어진 식이다. 즉, 식 (7)의 첫 번째 부분 $\delta_c(A_j, B_k)$ 는 근사모형에 대한 유사성이다. $\min_{VM} \sum_{(m, n) \in M} [1 - \delta_{ASVP}(A_m^{i+1}, B_n^{i+1})] / \max(n_A, n_B)$ 은 오차모형에 대한 비유사성이 된다. 식 (7)은 ASVP 트리의 유사성을 루트 노드가 나타내는 근사 모형의 유사성에서 오차모형을 나타내는 하위 부분트리의 비유사성을 가중치 $q \delta_{ASVP}(A_j, B_k)$ 를 적용하여 뺀 값으로 정의한 것이다.

식 (7)의 $\min_{VM} \sum_{(m, n) \in M} [1 - \delta_{ASVP}(A_m^{i+1}, B_n^{i+1})]$ 부분을 자세히 살펴보면, $\delta_{ASVP}(A_m^{i+1}, B_n^{i+1})$ 는 공간적인 연결성에 따라 분리된 두 오차모형의 ASVP 트리에 대한 유사성인데 이 값이 0과 1사이이므로, $1 - \delta_{ASVP}(A_m^{i+1}, B_n^{i+1})$ 은 비유사성(dissimilarity)의 척도가 된다. 각 ASVP 트리에서 공간적으로 분리된 오차모형이 다수일 때에는 이들을 적절히 서로 짝지어 비교해야 한다. 이 논문에서는 모든 가능한 짝짓는 방법에 대해서 비유사성의 합이 최소가 되는 방법을 기준으로 비유사성을 결정하였다. 비유사성이 최소가 되는 짝짓기는 결국 두 노드의 하위 부분트리들을 가장 비슷한 쌍으로 짝 지은 것을 의미하므로, 바람직하다고 할 수 있다. 짝짓기에서 $\max(n_A, n_B) - \min(n_A, n_B)$ 개의 요소는 짝이 존재할 수 없다. 이 요소들은 각각 공집합과 비교되는 것과 같으며, 이 때는 비유사성이 1이 된다.

한편, 위에서 구한 하위 부분트리의 비유사성에 상위의 유사성 값 $\delta_c(A_j, B_k)$ 을 곱해주는 이유는 근사

모형이 유사하지 않다면, 근사모형에 대한 오차모형의 유사성이 의미가 없다는 뜻이다. 마지막으로 가중치 q 는 앞에서 언급한 ASVP 트리의 성질에서 상위의 요소가 상대적으로 큰 비중을 가짐을 고려하기 위해 하위의 유사성에 곱하는 가중치이다. 따라서, q 는 0과 1사이의 값이 되어야 한다. 이 가중치 q 가 1에 가까울수록 전체 유사성에서 세부적인 형상에 대한 유사성을 더욱 높이 반영하게 되고, 0에 가까울수록 그 반대가 된다.

5.2 형상유사성의 성질

이 절에서는 ASVP 트리를 이용한 형상유사성 척도가 2.2절에서 언급한 성질을 만족함을 증명한다. 전체 부품의 형상유사성은 ASVP 요소 간의 유사성을 ASVP 트리 구조에 따라서 가중합 한 형태이므로, 요소 간 유사성의 성질이 먼저 밝혀져야 한다.

5.2.1 ASVP요소간 유사성의 성질

ASVP 요소간의 형상유사성 $\delta_{cs}(C_1, C_2)$ 는 앞 절에서 정의한 유사성의 기본 성질을 만족하여야 한다. $\delta_{cs}(C_1, C_2)$ 의 정의에서 알 수 있듯이, 크기가 1로 정규화된 두 행렬에 대한 거리척도를 변형한 것이므로, 다음과 같은 성질 i), ii)가 만족함을 쉽게 알 수 있다.

i) 경계조건 :

$$0 \leq \delta_{cs}(C_1, C_2) \leq 1$$

$$\delta_{cs}(C_1, \phi) = \sum_{i,j} g'_{1,ij} \cdot 0 = 0$$

$$\delta_{cs}(C_1, \phi) = \sum_{i,j} g'_{1,ij} \cdot g'_{1,ij} = |G'_1| = 1$$

ii) 대칭성: $\delta_{cs}(C_1, C_2) = \delta_{cs}(C_2, C_1)$

한편 $1 - \delta_{cs}(C_1, C_2) = \text{trace}[(G'_1 - G'_2)^T \cdot (G'_1 - G'_2)] / 2$ 이며, $\text{trace}[(G'_1 - G'_2)^T \cdot (G'_1 - G'_2)] / 2$ 는 행렬에 대한 거리 척도이므로, iii) 삼각부등식 관계도 만족함을 알 수 있다. $\delta_c(C'_1 - C'_2)$ 는 벡터에 대한 거리척도와 행렬에 대한 거리척도의 가중합이므로, 역시 마찬가지로 경계조건과 대칭성, 삼각부등식 관계를 만족한다.

5.2.2 형상유사성의 성질

ASVP 요소간 성질을 바탕으로 형상유사성의 성질도 만족함을 보일 수 있다. 먼저 아래 두 성질이 성립함은 쉽게 알 수 있다.

$$(i) \begin{cases} \delta(A, A) = 1 \\ \delta(A, \phi) = 0 \end{cases}$$

$$(ii) \delta(A, B) = \delta(B, A)$$

다음으로, $0 \leq \delta(A, B) = \delta_{ASVP}(A^1, B^1) \leq 1$ 은 귀납적인 과정을 통해서 만족됨을 알 수 있다. A^1, B^1 루트 노드로 하는 두 ASVP 트리의 최대 깊이(depth)를 d 라고 할 때, $(d-1)$ 단계에서 $\delta_{ASVP}(A^{d-1}, B^{d-1})$ 는 다음과 같이 $\delta_c(\cdot)$ 로만 표현되므로, $0 \leq \delta_{ASVP}(A^{d-1}, B^{d-1}) \leq 1$ 이 만족한다.

$$\delta_{ASVP}(A_j^{d-1}, B_k^{d-1}) = \delta_c(A_j^{d-1}, B_k^{d-1}) -$$

$$\frac{q \cdot \delta_c(A_j^{d-1}, B_k^{d-1})}{\max(n_A, n_B)} \cdot \min_{\forall M} \sum_{(m, n) \in M} [1 - \delta_c(A_m^d, B_n^d)]$$

$i \geq 2$ 인 임의의 $(i+1)$ -단계에서 $\delta_{ASVP}(A_m^{i+1}, B_n^{i+1}) \leq 1$ 이 만족한다고 하면, 다음 식에 의해서 i -단계에서도 $0 \leq \delta_{ASVP}(A^i, B^i) \leq 1$ 이 만족된다.

$$\delta_{ASVP}(A_j^i, B_k^i) = \delta_c(A_j^i, B_k^i) -$$

$$\frac{q \cdot \delta_c(A_j^i, B_k^i)}{\max(n_A, n_B)} \cdot \min_{\forall M} \sum_{(m, n) \in M} [1 - \delta_c(A_m^{i+1}, B_n^{i+1})]$$

마찬가지로, $i = 1$ 인 경우에도 다음 식에 의해서 $0 \leq \delta(A, B) = \delta_{ASVP}(A^1, B^1) \leq 1$ 임을 알 수 있다. 삼각부등식도 이와 같은 귀납적 방법으로 증명할 수 있다.

$$\delta_{ASVP}(A^1, B^1) = \delta_{cs}(A^1, B^1) -$$

$$\frac{q \cdot \delta_c(A^1, B^1)}{\max(n_A, n_B)} \cdot \min_{\forall M} \sum_{(m, n) \in M} [1 - \delta_c(A_m^2, B_n^2)]$$

6. 형상유사성의 적용가능성 실험

이 논문에서 제안한 형상검색 방법의 적용가능성을 알아보기 위해 실시한 실험결과를 정리하였다. 비교적 범용성을 인정받고 있는 오픈즈 코드에 의해 분류된 여러 가지 형상의 부품에 대해서 이 분류에 부합되는 유사성 평가치를 제공하는지를 실험한다.

6.1 예제 부품 데이터베이스

오픈즈 코드¹⁰⁾에서 비회전형 부품은 크게 긴 형태(long type), 납작한 형태(flat type), 정육면체에 가까운 형태(cubic type)의 개략형상으로 나뉘며, 각 형태에 대해서 형상의 특성에 따라 세부 개략형상 클래스로 나뉘게 된다. 오픈즈 코드에서는 개략형상 클래스 각각에 대해서 특징형상에 따라 다시 클래스를 구분하게 된다.

이 논문에서는 개략형상과 특징형상이 독립적으로 고려될 수 있도록, 총 19개의 부품으로 데이터베이스를 구성하였다. 이 부품들에 대해서 개략형상 별로 납작한 형태, 정육면체 형태, 긴 형태의 3개의 개략형상 클래스로 분류를 하였으며, 특징형상별 분류로는 주보어(principal bore)가 있는 부품과 다수의 홀(hole) 특징 형상이 존재하는 부품, 그리고 포켓(pocket)이 존재하는 3개의 특징형상의 클래스로 부품을 분류하였다. 개략형상 분류와 특징형상에 대한 분류의 조합으로 7개의 부품 클래스를 구성하였다. 선정된 대상 부품의 분류가 Fig. 4의 (a), (b), (c)에 나타나 있다.

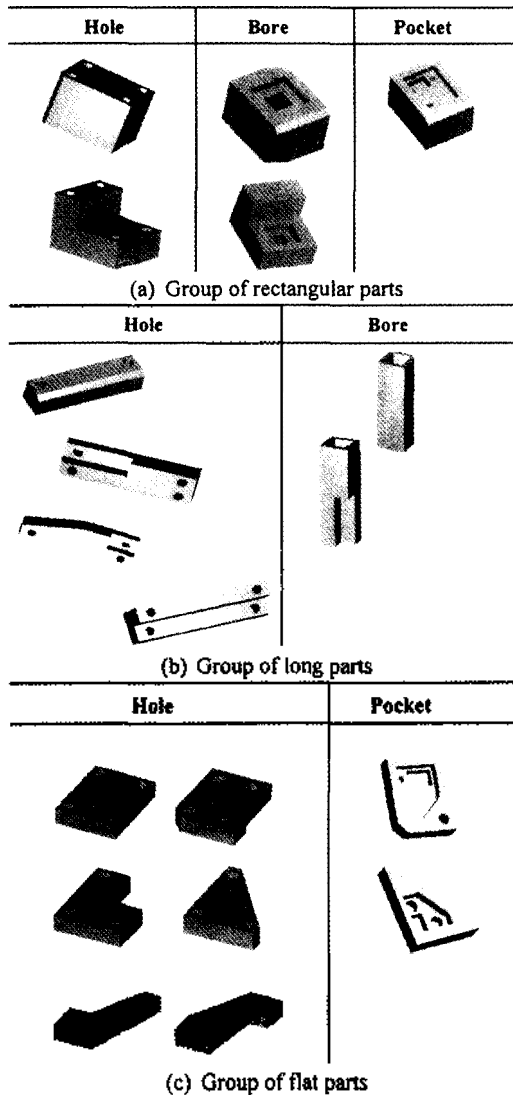


Fig. 4. Classification of example parts.

6.2 형상유사성 적용가능성 실험

형상유사성 척도가 오피츠 코드의 분류와 부합되는 유사성 값을 제공할 수 있는지 평가함으로써, 이 논문에서 제시한 형상유사성 척도의 적용가능성을 간접적으로 입증하고자 한다.

이를 위해서는 형상유사성 척도가 오피츠 코드의 분류와 부합될 수 있는지를 평가할 수 있는 방법이 필요하다. 먼저 형상유사성 척도를 이용하여 다음과 같이 두 부품이 같은 클래스에 속하는 지에 대한 일종의 테스트를 할 수 있다.

어떤 임계치 δ 에 대해서,
 $\delta(A, B) > \delta$ 이면 A, B는 같은 클래스에 속함

이 테스트에 대한 오류를 다음과 같이 정의할 수 있다. 세 형상 A, B, C에 대해서, 두 형상 A, B가 같은 클래스에 속하고, A, C가 다른 클래스에 속하는 경우에 대해서 살펴보자. 형상검색에서 $\delta(A, B) > \delta$ 와 $\delta(A, C) \leq \delta$ 인 경우는 형상유사성 δ 는 분류에 부합되는 유사성 척도가 된다. 그 반대의 경우, 즉 $\delta(A, B) \leq \delta$ 이거나 $\delta(A, C) > \delta$ 인 경우에는 유사성 척도가 분류에 적합하지 못한 경우가 된다. 이런 오류를 다음과 같이 두 종류로 나눌 수 있다.

I형태 오류(Type I Error) : $\delta(A, B) \leq \delta$

II형태 오류(Type II Error) : $\delta(A, C) > \delta$

실제 형상검색에 있어서, I형태 오류는 유사한 형상이 있음에도 시스템이 이를 제시하지 못하는 경우이며, II형태 오류는 유사하지 않은 형상을 비슷한 것으로 제시한 것으로 사용자가 판단할 수 있는 여지가 남아있다. 따라서 I 형태가 보다 중요한 오류이다.

대상 부품의 분류에 대해서 오류의 빈도를 살펴보는 실험을 통해 형상유사성 척도의 적용가능성을 평가해 볼 수 있다. ASVP 형상유사성 척도는 5.1절 식 (7)과 식 (5)의 정의에서 볼 수 있듯이 ASVP트리의 단계간의 가중치를 나타내는 상수 q 와 각 ASVP 노드의 형태와 위치에 대한 상대적인 가중치 w_s, w_l ($w_s + w_l = 1$)을 포함하고 있다. 실험에서는 다음 Table 1과 같이 이 가중치를 등 간격으로 변화해 가면서 형상유사성을 계산한다.

Table 1. Range of weights

가중치	값의 범위
q	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
w_s ($= 1 - w_l$)	0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7

Table 2. Experimental results

$w_s \setminus q$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.3	16%	16%	16%	20%	24%
	8%	12%	12%	16%	20%
	0%	0%	4%	12%	8%
	16%	20%	16%	20%	24%
0.4	8%	8%	12%	16%	20%
	0%	0%	4%	12%	8%
	24%	20%	24%	20%	28%
0.5	12%	16%	16%	20%	24%
	0%	0%	4%	8%	16%
	16%	20%	16%	20%	24%
0.6	4%	12%	16%	20%	24%
	0%	0%	4%	12%	8%
	16%	20%	16%	20%	24%
0.7	8%	12%	12%	16%	16%
	0%	0%	4%	12%	12%

또한 테스트의 임계치 설정에 따라 오류가 달라지게 된다. 이 실험에서는 II형태의 오류가 10%, 15%, 20%를 넘지않는 기준에서 I형태 오류의 빈도를 정리하였다. 실험 결과는 Table 2에 정리하였다. 표에서 각 칸의 내용은 II형태 오류 빈도의 최대치가 10%, 15%, 20%일 때, I형태 오류의 빈도를 나타낸 것이다.

실험결과를 보면, q 값이 0.4 이상 증가할수록 점차 오류의 빈도가 늘어남을 알 수 있다. 그리고, w_s 의 값에 대한 영향은 상대적으로 작지만, 대체로 0.5가 아닌 값에 대해서 낮은 오류 빈도를 나타내었다. 즉, 요소의 형태 비교에서 위치나 형태 중 한쪽에 높은 가중치를 부여하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 또한 I형태의 오류가 상대적으로 중요함을 고려하면, II형태의 오류를 15% 이상 허용하도록 검색시스템을 설계하는 것이 바람직하다.

전체적으로 $q=0.2$ 또는 0.3, $w_s=0.3, 0.4$, 또는 0.6으로 설정된 형상유사성 척도를 이용하면, II형태 오류가 15%~20%, I형태 오류가 10%이하로 오피츠 코드의 분류와 일치하는 검색을 행할 수 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 ASVP 트리를 이용한 부품의 3차원 형상에 대한 유사성을 평가하는 방안을 개발하였다. ASVP 트리의 각 요소에 대한 유사성 척도와 이를 ASVP트리 구조에 따라 가중한 한 형상유사성 척도를 정의하였으며, 이를 평가하는 방법을 제시하였

다. 그리고, 범용 GT 코드인 오피츠 코드에 따라 분류된 부품들에 대해서 이 논문에서 제시한 형상유사성 척도가 이와 유사한 분류를 제공할 수 있음을 실험을 통해서 확인하였다.

제시된 형상유사성 평가방법은 개략형상과 특징형상과 같은 기계 부품에 적합한 형상 특성을 고려하며, 가중치를 적절히 설정하여 응용의 특성이나 검색자의 유사성 개념을 반영할 수 있다. 이 기술은 제품 개발 과정에서 기존 설계의 검색과 재사용, 설계 데이터에 대한 효과적인 분류와 검색 수단을 제공할 수 있다.

ASVP 트리를 이용한 유사성 평가 방법은 몇 가지 문제점을 가진다. 우선 ASVP 방법이 가지는 문제로서 그 적용이 다면체 솔리드 모델에 제한되는 것이다. 이 경우는 원통면이나 블렌딩 곡면에 적용되는 확장된 ASVP 방법^{16,17}을 이용함으로써 다소 해결될 것이다. 그리고, 분할이 있는 경우 ASVP 트리의 유일성이 보장되지 않는 단점이 있으며, 일관된 분할 규칙을 제공하거나 다수의 ASVP 트리를 이용하는 방법을 통하여 개선될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다(과제번호: 97-02-00-09-01-3).

참고문헌

- Alt, H., Aichholzer, O. and Rote, G., "Matching shapes with a reference point," *Proceedings of the 10th ACM Annual Symposium on Computational Geometry*, 94, Stony Brook, NY, USA, pp. 85-92.
- Berchtold, S. and Kriegel, H. P., "S3: Similarity Search in CAD Database Systems," *Proceedings of VLDB Conference*, 1996
- Elinson, A., Nau, D. S. and Regli, W. C., "Feature-based Similarity Assessment of Solid," *ACM Solid Modeling Conference*, May 1997.
- Kim, Y. S., "Recognition of form features using convex decomposition," *Computer Aided Design*, Vol. 24, No. 9, pp. 461-476, Sep. 1992.
- Mehrotra, R. and Gary J. E., Feature-based retrieval of similar shapes, *Proceedings of 9-th International Conference on Data Engineering*, Austria, pp. 108-115, 1993.
- Menon, S. and Kim, Y. S., "Cylindrical features in form feature recognition using convex decomposition," *Proceedings of IFIP Conference on Feature Modeling and*

Recognition in Advanced CAD/CAM Systems, pp. 295-314, May 1994.

7. Menon, S. and Kim, Y. S., "Handling blending features in form feature recognition using convex decomposition," *ASME Conference on Computers in Engineering*, pp. 79-92, 1994.
8. Sun, T-L., Su, C-J., Mayer, R. J. and Wysk, R. A., "Shape similarity assessment of mechanical parts based on solid models," *ASME Design Engineering Technical Conferences*, Vol. 83(2), pp. 953-962, 1995.
9. Bedworth, D. D., Henderson, M. R., and Wolfe, P. M., *Computer Integrated Design and Manufacturing*, McGraw-Hill Inc, 1991.
10. Opitz, H., *A Classification System to Describe Workpieces*, Pergamon Press, Ltd., Oxford, England.
11. Papadimitriou, C. H. and Steiglitz, K., *Combinatorial Optimization: Algorithm and Complexity*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1982.
12. 김철영, *기계 부품의 형상검색을 위한 유사성 평가 방법*, 서울대학교 공학박사학위논문, 1999.



김 철 영

1992년 서울대학교 산업공학과 학사
 1994년 서울대학교 산업공학과 공학석사
 1999년 서울대학교 산업공학과 공학박사
 1999년-현재 LG-EDS 재직 중
 관심분야: 생산정보시스템, 객체지향데이터베이스시스템, 동시공학, PDM



김 영 호

1985년 서울대학교 산업공학과 학사
 1987년 서울대학교 산업공학과 석사
 1988년-1990년 한국과학기술연구원 연구원
 1993년 North Carolina 주립대 산업공학과 공학박사]
 1993-1995년 전북대학교 산업공학과 전임 강사
 1995년-현재 서울대학교 산업공학과 조교수
 관심분야: 정보시스템, 동시공학, 인터넷 응용, Internet 기반 PDM개발, Work flow 관리 시스템 개발, 의료정보 시스템 등



강 석 호

1970년 서울대학교 물리학과 학사
 1972년 미국 Univ. of Washington 산업공학과 공학석사
 1976년 미국 Texas A & M Univ. 산업공학과 교수
 1976-현재 서울대학교 산업공학과 교수
 관심분야: 생산정보시스템의 설계와 운용, 지능형 생산 시스템, 경영정보시스템, 생산 계획 및 통제