

임의 형상의 복합재 모델링을 위한 CSG 기반 표현

신기훈*, 이진구**

CSG-based Representation for Free-form Heterogeneous Object Modeling

Shin, K. H.* and Lee, J. K.**

ABSTRACT

This paper proposes a CSG-based representation scheme for heterogeneous objects including multi-material objects and Functionally Graded Materials (FGMs). In particular, this scheme focuses on the construction of complicated heterogeneous objects guaranteeing desired material continuities at all the interfaces. In order to create various types of heterogeneous primitives, we first describe methods for specifying material composition functions such as geometry-independent, geometry-dependent functions. Constructive Material Composition (CMC) and corresponding heterogeneous Boolean Operators (e.g. material union, difference, intersection, and partition) are then proposed to illustrate how material continuities are dealt with. Finally, we describe the model hierarchy and data structure for computer representation. Even though the proposed scheme alone is sufficient for modeling all sorts of heterogeneous objects, the proposed scheme adopts a hybrid representation between CSG and decomposition. That is because hybrid representation can avoid the unnecessary growth of binary trees.

Key words : CSG, Heterogeneous Objects, FGMs, Constructive Material Composition, Boolean Operators

1. 서 론

전통적인 CAD/CAM 시스템들은 지금까지는 제품의 기하학적 형상(geometry)의 표현 및 가공정보의 생성에 초점을 맞추어 왔다. 하지만 최근에 와서 최적구조설계(structural optimization) 및 적층조형(Layered Manufacturing, LM) 방식과 같은 신기술이 개발됨에 따라, 기능성 경사복합재(Functionally Graded Material, FGM) 및 복합 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 장치 등의 설계 및 생산에 이 기술들을 응용할 수 있게 되었다. 그러므로 현재의 CAD/CAM 시스템들은 제품의 기하학적 형상뿐 아니라 형상 내부의 재질성분(material composition)이나 미세결정구조(microstructure)를 모델링할 수 있도록 그 기능이 확장되어야만 한다.

복합재 형상모델(Heterogeneous Solid Model,

HSM)은 형상 내부에 재질성분 및 미세결정구조 정보를 가지고 있는 3차원 모델로 정의될 수 있다. 일반적으로 복합재 형상은 다중 복합재(Multi-material Objects)와 기능성 경사복합재(FGM) 등 두 가지로 구분된다. 다중 복합재에는 일상에서 많이 접할 수 있는 다중 복합재(composite) 혹은 복합재 조립체(assembly) 등과 같이 이방성 재료가 뚜렷한 경계면들이 존재한다. Fig. 1(a)는 전형적인 다중 복합재 예로 Stanford 대학의 SDM(Shape Deposition Manufacturing) 머신에 의해 제작된 곤충다리 모델을 보여주고 있는데, 각종 전기장치 및 센서 등이 내장되어 있다¹⁾.

현재 활발한 연구가 진행되고 있는 기능성 경사복합재에는 형상의 변화에 따른 연속적인 재질성분의 변화가 존재한다. Fig. 1(b)는 전형적인 기능성 경사복합재 예로 터빈 블레이드(turbine blade) 모델을 보여주고 있다. 터빈 블레이드는 일반적으로 고온, 고압 조건에 노출되므로, 충분한 열보호 효과를 주기 위해서 블레이드의 외부 재료로 세라믹이 추천되며, 한편 충분한 기계적 강도를 확보하기 위해서는 블레이드의 내부 재료로 메달이 추천될 수 있다. 하지만 두

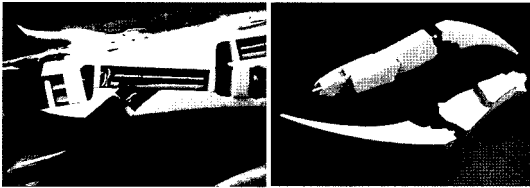
*중신회원, 서울산업대학교 기계공학과

**교신저자, 서울산업대학교 기계공학과

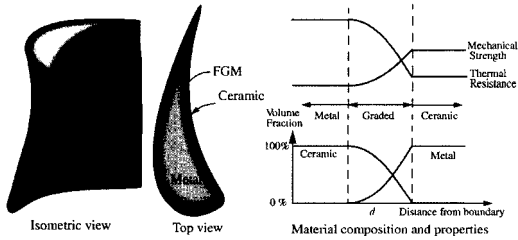
- 논문투고일: 2005. 07. 13

- 심사완료일: 2006. 01. 27

이방성 재료의 직접적인 접촉은 경계면에서 발생하는 열잔류응력(thermal residual stress)의 차이로 인하여 경계면 박리(delamination) 현상을 초래하게 된다. 이것이 블레이드 모델에 FGM 설계가 적용되어야 하는 직접적인 이유이다. Fig. 1(b)의 오른쪽 그래프는 기계적 강도(mechanical strength) 및 열저항력(thermal resistance) 등과 같은 전형적인 재료 물성치의 변화를 재질성분의 변화에 대하여 보여주고 있다. 이러한 물성치의 변화는 세라믹(ceramic)에서 메탈(metal)로의 재질성분 변화에 따른 필연적인 결과이다.



(a) Bio-mimetic insect leg



(b) FGM turbine blade

Fig. 1. Heterogeneous objects.

하지만 현재의 CAD 형상모델들은 이러한 복합재 내부의 재질성분이나 미세결정구조 등을 효과적으로 표현할 수 없다. 그러므로 이러한 복합재의 설계, 해석, 생산을 위한 출발점으로 새로운 CAD 표현방법의 개발이 절실히 요구되고 있다. 본 논문에서는 널리 알려진 CSG(Constructive Solid Geometry) 모델링에 기반한 복합재 모델의 새로운 CAD 표현방법을 제안하고자 한다.

1.1 선행연구

지금까지 복합재를 표현하기 위해서 유한요소 기반^[2], 복셀기반^[3], 분해기반^[4], feature기반^[5,7] 표현법 등이 제안되었다. Jackson^[2] 등은 사면체 유한요소 기반 모델(tetrahedron mesh-based model)을 제안하였다. 이 모델에서 각각의 사면체 요소는 네 개의 노드(node)를 가지고 있으며, 각각의 노드는 3차원

공간에서의 위치 정보뿐만 아니라 재질성분(material composition) 정보를 가지고 있다. Wu^[3] 등은 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 표현과 복셀기반 표현법을 혼합한 모델을 제안하였다. Kumar와 Dutta^[4]는 복합재의 표현을 위한 수학적 배경으로 분해에 기반한 r_m -object 모델을 제안하였다. 한편 최근에 와서 Samanta^[5], Liu^[6], Qian^[7] 등은 복합재 feature에 기반한 모델링 기법을 제안하였다.

임의 형상의 복합재를 표현하기 위하여, 유한요소 기반 및 복셀기반 표현법 등은 먼저 유한요소 및 복셀의 생성단계를 필요로 한다. 하지만 이러한 근사화 과정에 의해 기하학적 형상 및 재질성분의 표현은 부정확할 수 밖에 없다. 한편 분해기반 표현법은 원래의 형상을 단순한 여러 개의 형상으로 분해하는 과정이 필요하다. 그러므로 새로 생성되는 단순한 형상들의 경계면에서 중복적인 엔티티(vertices, edges, faces)가 생성되어 계산을 복잡하게 만들거나 경계면에서의 재질 연속성을 어떻게 보장할 것인가 등이 문제로 대두될 수 있다. 한편 feature 기반 모델링 기법들은 대부분 형상의 생성 후 재질성분의 합성이라는 2단계 과정을 거쳐 복합재를 모델링할 수 있는 기능들을 제공하지만, 현재 CAD 시스템에서와 같은 수준의 일반적인 모델링 기능들을 복합재 모델링을 위해서 제공하고 있지는 못하다.

본 논문은 선행연구로서 참고문헌^[8]에서 본 저자가 소개한 “복합재의 FEA 기반 설계를 위한 통합 CAD 시스템”의 핵심부분인 복합재 형상모델러(Heterogeneous Solid Modeler)의 구현을 위해서 제안한 CAD표현법을 구체적으로 소개하도록 하겠다. 참고문헌^[8]에서는 단순한 압력관 모델의 FEA 기반 설계과정 및 통합 CAD 시스템의 원형(prototype)이 소개되었었다.

1.2 CSG 기반 표현

기존 표현법들의 장, 단점을 고려하여 본 논문에서는 CAD 분야에서 널리 사용되고 있는 CSG 방법을 임의 형상의 복합재 모델링에 확장 적용하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 CSG 형상 모델링과 마찬가지로 최종 복합재를 단순한 복합재간에 불리언 작업(Boolean operation)을 적용하여 표현한다. 특히 제안된 방법은 각각의 이방성 형상 경계면에서 재질성분의 연속성을 보장하는데 초점을 맞추고 있다. 본 논문에서 구체적으로 소개될 내용은 다음과 같다.

- 프리미티브 복합재(heterogeneous primitives)

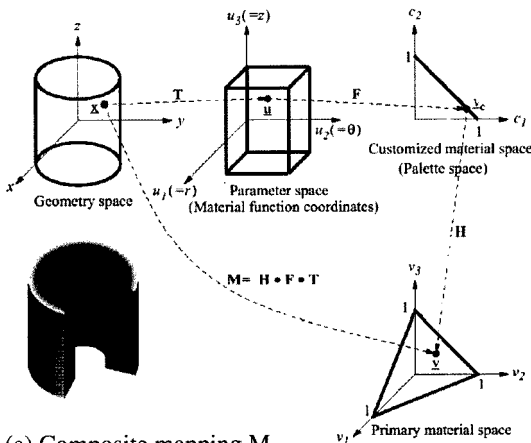
- 이방성 불리언 작업자(heterogeneous Boolean operators)
- 모델계층도(model hierarchy) 및 데이터 구조

2. 프리미티브 복합재(hp-set)의 생성

복합재의 CSG 기반 표현을 위한 최소 기본단위로써 프리미티브 복합재(hp-set)는 곱공간(product space) $T(= E^3 \times R^n)$ 의 부분집합 $(G, M(G))$ 으로 정의된다. 여기서 $G(\subset E^3)$ 는 복합재의 기하학적 형상을 표현하며, $M(G)(\subset R^n)$ 은 형상 G에 매핑된 재질성분 정보의 집합을 나타낸다. 본 장에서는 hp-set 생성을 위한 모델링 공간 및 기본적인 hp-set 생성 방법에 대해서 소개하도록 하겠다.

2.1 hp-set의 모델링 공간

복합재는 다수(n 개)의 주성분 재료(primary materials)로 구성되므로, 임의의 점 \underline{x} 에서 재질성분은 주성분 재료의 부피퍼센트(volume fraction)로 표현된다. 이 부피퍼센트는 n 차원 점 \underline{v} 로 표시되며, 이들의 집합 (V) 은 R^n 공간의 부분집합으로 아래와 같이 표현된다.



(a) Composite mapping M

n primary materials $\underline{v}(r_a) = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ $\underline{v}(r_b) = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ $F = [f_1, f_2, \dots, f_{n+1}]^T$ $f_i(r) = \frac{b_i - a_i}{r_b - r_a}(r - r_a) + a_i$	Two customized materials $(\underline{h}_1, \underline{h}_2)$ $\underline{h}_1 = \underline{v}(r_a), \underline{h}_2 = \underline{v}(r_b)$ $\underline{v}_c(r_a) = [1, 0]^T, \underline{v}_c(r_b) = [0, 1]^T$ $F = [f_1, f_2]^T = [f_1, 1 - f_1]^T$ $f_1(r) = \frac{-1}{r_b - r_a}(r - r_a) + 1$
--	--

(b) Material space transform

Fig. 2. Modeling space for hp-set.

$$V = \left\{ \underline{v} \in R^n \mid \|\underline{v}\|_1 = \sum_{i=1}^n v_i = 1 \text{ and } v_i \geq 0 \right\} \quad (1)$$

위 식 (1)에서 v_i 는 i 번째 주성분 재료의 부피퍼센트를 나타낸다. Fig. 2(a)는 임의의 점 \underline{x} 를 재질성분 점 \underline{v} 로 대응시키는 합성 매핑 M이 T, F, H 등의 컴포넌트 매핑으로 구성되어 있음을 보여주고 있다.

제안된 hp-set 모델링 공간의 특징은, 매개변수 공간(parameter space)을 도입하여 재질성분 함수의 집합인 F의 정의를 용이하게 했다는 것과 $k(<n)$ 개의 사용자 정의 재질(customized material)을 n 개의 주성분 재료의 최종 매핑 전에 도입하여 Fig. 2(b)에서와 같이 F의 컴포넌트 함수를 단순화시킬 수 있다는 것이다. 사용자 정의 재질은 주성분 재료의 어떤 조합도 가능하다는 점에서 사용자 재질 공간은 화가의 팔레트에 비유될 수 있다. 만약 n 개의 주성분 재질이 실린더 좌표계의 $r = r_a$ 와 $r = r_b$ 사이에서 정의된다면, $n - 1$ 개의 컴포넌트 함수(f_1, \dots, f_{n-1})가 정의될 필요가 있다. 하지만 두 개의 사용자 정의 재질($\underline{h}_1 = \underline{v}(r_a), \underline{h}_2 = \underline{v}(r_b)$)을 사용한다면, 단지 하나의 컴포넌트 함수 f_1 만으로도 충분하다. 예로 금형 재료로 이용되는 H13 스틸은 C, Si, Mn, Cr, Mo, V, P, S, O, N, Fe 등의 11개 구성성분으로 구성되어 있지만 이를 하나의 사용자 정의 재질로 나타낼 수 있다.

제일 먼저 매핑 T는 식 (2)와 같이 3차원 상의 임의의 점 \underline{x} 를 매개변수 점 \underline{u} 로 대응시키는 일대일 매핑(one to one mapping)이다.

$$T: E^3 \rightarrow R^{\dim(\underline{u})} \{ T(\underline{x} \in E^3) \equiv \underline{u} = \{u_i\} \} \quad (2)$$

위 식 (2)에서 $\dim(\underline{u})$ 는 매개변수 공간의 차원을 의미한다. 한 예로 Fig. 2(a)에서와 같은 실린더 좌표계가 도입된다면 T는 아래 식 (3)과 같이 정의되며, $\dim(\underline{u}) \leq 3$ 이 된다.

$$T(\underline{x}) = \left[\sqrt{x^2 + y^2}, \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), z \right] = [r, \theta, z] = \underline{u} \quad (3)$$

다음으로, 매개변수 공간 상에 재질성분 함수 집합인 F를 정의하여 매개변수 점 \underline{u} 를 사용자 정의 재질(customized material) 점 \underline{v}_c 로 아래 식 (4)와 같이 일대일 매핑시킨다.

$$F: R^{\dim(\underline{u})} \rightarrow V_c \mid \|F(\underline{u})\|_1 = \sum_{i=1}^k f_i(\underline{u}) = 1$$

where $F(\underline{u}) \equiv \underline{v}_c = \{c_i\}$ (4)

위 식 (4)에서 k 는 사용자 정의 재질의 개수를 의미하며, c_i 는 i 번째 사용자 정의 재질의 부피퍼센트를 나타낸다. 마지막으로 H 는 사용자 정의 재질 점 \underline{v}_c 를 주성분 재질 점 \underline{v} 로 대응시키는 일대일 매핑으로 아래 식 (5)와 같이 정의된다.

$$H: \underline{v}_c \rightarrow \underline{v} \quad \|\underline{H}(\underline{v}_c)\|_1 = \sum_{i=1}^n h_i(\underline{v}_c) = 1$$

where $\underline{H}(\underline{v}_c) = \underline{v} = \{v_i\}$ (5)

실제적으로 매핑 H 는 아래 식 (6)과 같은 $n \times k$ 행렬을 사용하여 나타낼 수 있다. $h_i \in \underline{V} (i=1, \dots, k)$ 는 i 번째 사용자 정의 재질을 의미한다.

$$\underline{v} = H(\underline{v}_c) = \underline{h} \cdot \underline{v}_c$$
 (6)

where $\underline{v} = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]^T, \underline{v}_c = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_k]^T$

$$[\underline{h}] = [\underline{h}_1 \ \underline{h}_2 \ \dots \ \underline{h}_k] = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1k} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nk} \end{bmatrix}$$

2.2 hp-set의 생성방법

전술한 바와 같이 합성 매핑 M 은 매개변수 변환 T , 재질성분 함수 집합 F , 재질 공간 변환 H 의 합성 변환으로 정의된다. 본 장에서 소개될 몇 가지 hp-set 생성방법들은 매개변수 변환 T 의 선택에 전적으로 좌우되며, 아래와 같은 재질성분 함수들이 기본적인 hp-set 생성 과정에 적용될 수 있다.

- 형상 독립 재질성분 함수
 - 직교 좌표계(Cartesian), 실린더 좌표계, 구좌표계 함수
- 형상 종속 재질성분 함수
 - 직교거리 기반 함수(distance-based function)
 - 블렌딩 함수(blending function)
 - 스위핑 함수(sweeping function)

2.2.1 형상 독립 재질성분 함수

복합체의 기하학적 형상에 독립적인 좌표계(직교좌표계, 실린더 좌표계, 구좌표계)에서 재질성분 함수 F 를 정의함으로써 기본적인 프리미티브 복합체를 생성할 수 있다. Fig. 3(a)는 직교좌표계에서 정의된 재질성분 함수를 이용하여 생성된 다층 복합체를 보여주고 있다. Fig. 3(b)는 열보호 층을 가지는 메탈과 세

라믹 성분이 혼합된 FGM 입력관⁽⁸⁾ 모델을 보여주고 있다. 이 모델에서 재질성분 함수는 실린더 좌표계에서 용이하게 정의될 수 있다. Fig. 3(c)은 구좌표계에서 정의된 재질성분 함수를 이용하여 내마모 특성을 향상시킬 수 있는 FGM 볼 조인트를 보여주고 있다.

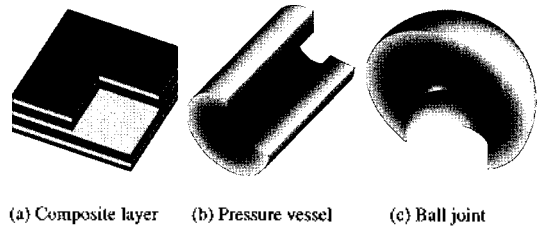


Fig. 3. hp-sets using geometry-independent material functions

2.2.2 직교거리 기반 재질성분 함수

복합체의 경계에 존재하는 엔티티(꼭지점, 모서리, 곡면, 셸)로부터의 최단 직교거리를 매개변수로 하여 형상 내부의 재질성분을 효율적으로 표현할 수 있다. 한 꼭지점(vertex)으로부터 정의되는 직교거리 기반 재질성분 함수는 구좌표계에서 정의되는 형상 독립 재질성분 함수와 거의 흡사하다.

Fig. 4(a)는 스틸 위에 얇은 지르코늄(zirconia) 코팅막을 가지는 FGM 피스톤 헤드를 도시하고 있다. 지르코늄으로부터 스틸로의 재질성분 변화는 피스톤 헤드의 외부 경계 곡면으로부터의 최단 직교거리에 비례하여 변화하게 된다. 지르코늄 코팅막을 적용함으로써 피스톤 헤드의 열변형을 최소화하고 내마모성을 향상시킬 수 있다. 한편 Fig. 4(b)는 금속 표면에 얇은 세라믹 코팅막을 가지는 FGM 터빈 블레이드를 도시하고 있다. 역시 세라믹 코팅을 적용함으로써 열보호 효과 및 내산화(anti-oxidation) 특성을 향상시킬 수 있다.

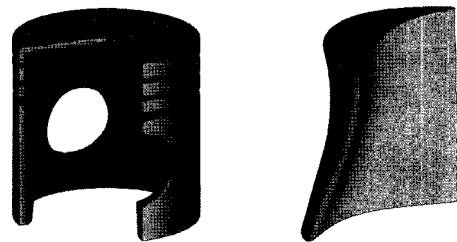


Fig. 4. hp-sets using distance-based material functions.

2.2.3 블렌딩 재질성분 함수

이 방법은 다수의 분리 독립된 경계 엔티티들로 부터의 최단 직교거리들로 표현되는 블렌딩 좌표들을 매개변수로 하는 재질성분 함수를 정의하여 기본적인 프리미티브 복합체를 생성한다. 경계 엔티티로 둘러싸인 중간영역을 블렌딩하는 방법에는 여러 가지 방법이 가능하나, 본 논문에서는 역거리 가중법(inverse distance weighting)을 이용하여 재질성분의 블렌딩에 사용되는 매개변수들을 계산하였다. 만약 복합체 내부에 p 개의 분리 독립된 경계 엔티티가 존재한다고 가정하면, 각각의 경계 엔티티에 p 개의 사용자 정의 재질을 부여하여 중간영역의 재질성분을 부드럽게 블렌딩할 수 있다.

역거리 가중법을 이용하면, 사용자 정의 재질 부피 퍼센트 v_c 는 아래 식 (7)과 같이 i 번째 경계 엔티티 (∂B_i) 에 부여된 i 번째 사용자 정의 재질 (h_i) 과 블렌딩 좌표(u_i)의 일차적 결합으로 표시할 수 있다.

$$v_c(\underline{x}) = \sum_{i=1}^p h_i \cdot u_i(\underline{x}) \quad (7)$$

$$\text{where } u_i(\underline{x}) = \frac{\prod_{j=1, j \neq i}^p d_j^{\mu_j}(\underline{x})}{\sum_{k=1}^p \prod_{j=1, j \neq k}^p d_j^{\mu_j}(\underline{x})} \text{ and } \sum_{i=1}^p u_i(\underline{x}) = 1$$

블렌딩 좌표 u_i 는 각각의 경계 엔티티들로부터의 역거리를 표준화하여 계산되므로, i 번째 사용자 정의 재질 (h_i) 이 부여된 i 번째 경계 엔티티(∂B_i) 로 부터의 거리($d_i(\underline{x})$) 에 반비례하는 특성을 가진다. 또한 u_i 는 Fig. 5에서와 같이 $u_i(\partial B_j) = \delta_{ij}$ 조건을 만족하며 그 합이 1이 되는 연속함수이다. 위 식 (7)에서 지수 μ_i 는 가중함수의 특성을 좌우하는 계수이다.

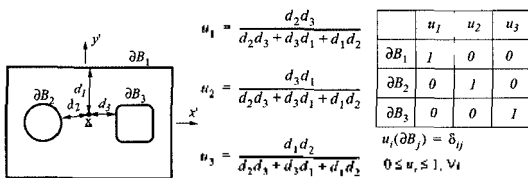


Fig. 5. hp-sets using inverse distance weighting.

Fig. 5는 3개의 닫힌 루프를 가지는 입의 형상에서 역거리 가중법을 이용하여 매개변수들을 계산한 예를 보여주고 있다. 즉 3개의 블렌딩 좌표 u_1, u_2, u_3 식 (7)에 $p = 3$ 과 $\mu_i = 1$ 을 대입하여 계산할 수 있다.

Fig. 6은 역거리 가중법을 이용하여 하나의 캐비티를 가지는 간단한 사출금형 틀의 재질성분을 모델링한 예를 보여주고 있다.

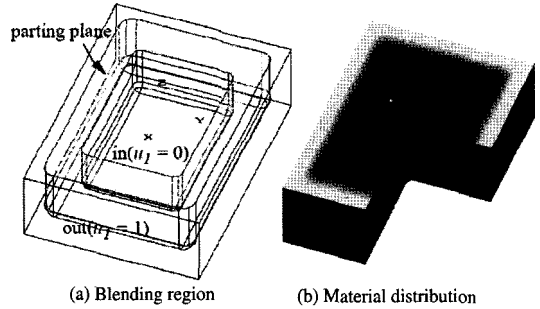


Fig. 6. A simple FGM mould.

Fig. 6(a)는 블렌딩 영역을 정의하는 과정을 보여주고 있는데, 두 경계 엔티티(in, out)는 분할면(parting plane)에 의해 분리되어 있다. 이 모델에서는 각각의 방향(x, y, z)으로 FGM 층의 두께를 달리하여 사출금형 틀의 부피 수축 특성을 조절할 수 있는 장점이 있다.

2.2.4 스위핑 재질성분 함수

이 방법은 스위핑 작업에 의해 생성될 수 있는 프리미티브 복합체의 재질성분 분포를 정의하는 데 적합하다. Fig. 7은 앞서 소개한 블렌딩 방법을 이용하여 사출금형 틀 내부에 형성된 냉각회로 단면의 재질 분포를 정의한 예를 보여주고 있다. 이 예에서는 단면의 내부 경계면에는 구리(Copper)를 외부 경계면에는 H13 스틸 재질성분을 부여하여 중간영역의 재질 분포를 부드럽게 블렌딩하고 있다. 냉각회로의 기능은 사출금형의 캐비티로부터 냉각수로의 열전달률을 조절함으로써 시출물의 열변형을 최소화하고, 사출주기를

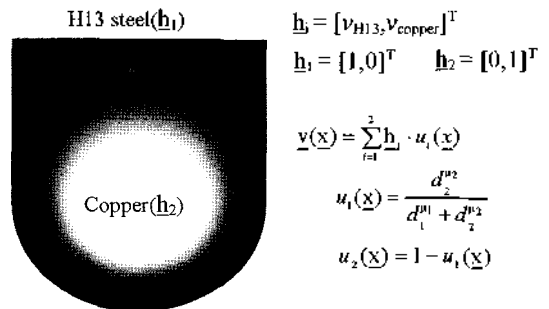


Fig. 7. Material distribution on the cross section of the cooling channels.

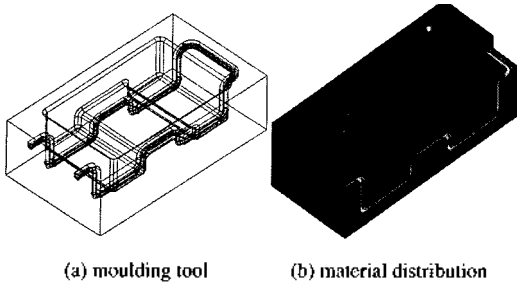


Fig. 8. Moulding tool embedding conformable cooling channels.

줄여 양산성을 향상시키는 것이다. 일반적으로 사출 금형 틀의 재질로는 H13 스틸이, 냉각회로의 주재료로는 구리가 널리 사용되고 있다. Fig. 7에 보인 가중 함수의 지수값(μ)을 변화시켜 가면서 냉각회로의 냉각 특성을 사출물에 맞게 최적화할 수 있다.

Fig. 7에 보인 냉각회로 단면에서의 재질분포를 스위핑 경로를 따라 동일하게 적용하면, Fig. 8에서와 같은 재질성분 분포를 얻을 수 있다. 특히 Fig. 8에 보인 냉각회로는 사출금형의 캐비티의 형상에 순응적으로 형성되어 균일한 냉각특성을 얻을 수 있다. 이러한 순응적인 냉각회로의 생성은 기존의 머시닝으로는 불가능하며, DMD(Direct Metal Deposition), SDM(Shape Deposition Method), 3DP(Three Dimensional Printing)과 같은 적층조형 방법에 의해서만 가능하다.

3. 복합재를 위한 이방성 불리언 작업

전술한 방법들에 의해 다양한 형상 및 재질성분을 가지는 프리미티브 복합재(*hp-set*)들이 생성되면, 새롭게 고안된 이방성 불리언 작업(*heterogeneous Boolean operation*)을 거쳐 한층 복잡한 복합재를 정의할 수 있다. 즉, CSG 형상 모델링과 마찬가지로 상위 단계의 복합재는 단순한 복합재(프리미티브 복합재 혹은 하위 단계의 복합재)들 간의 CSG 이진트리(binary tree) 구성으로 표현될 수 있다. CSG 기반 표현법의 특징은 모델의 생성 및 수정이 용이하다는 것이다. 하지만 CSG 기반 표현법의 단점은 B-rep 모델링^[21]에서 일반화되어 있는 블렌딩이나 트위킹(*tweaking*) 같은 부분적인 작업이 어렵다는 것이다. 또한 불리언 작업에 의한 이진트리의 성장이 과도하면, 이진트리를 거처서 하위 단계의 모델에 접근하는 계산과정이 복잡해진다는 것이다. 그러므로 본 논문에서 제안된 방법은 CSG 및 분해(*decomposition*)를 혼합한 표현법을 사용하여 불필요한 이진트리의 성장을

억제할 수 있도록 하였다. 또한 그래픽 작업 및 in-out 테스트의 효율성을 향상시키기 위하여 이진트리의 각 노드점(*leaf*, *internal*, *root*)에 존재하는 복합재의 형상은 B-rep 방법으로 표현하고, 재질성분은 이진트리 구조로 구성하는 혼합적(*hybrid*) 표현법을 사용한다.

3.1 불리언 복합재(*hb-set*)의 생성

이방성 불리언 작업을 수행하여 생성되는 복합재를 정의함에 있어 가장 중요한 사항은 하위 단계 복합재 간의 경계면에서 재질성분의 연속성을 어떻게 보장할 수 있는나는 문제이다. 이 문제에 효과적으로 대응하기 위해 본 논문에서는 이방성 불리언 작업에 의해 생성되는 새로운 복합재를 하나의 불리언 복합재(*hb-set*)로 정의 한다. 즉, 불리언 복합재는 B-rep 형태로 표현되는 최종 형상 및 CMC(Constructive Material Composition)로 명명되는 이진트리 재질정보를 구성 요소로 가진다. 좀 더 구체적으로 CMC는 적용된 이방성 불리언 작업(합집합, 교집합, 차집합, 파티션), 두 하위 단계 복합재 정보, 경계면에서의 재질성분 블렌딩 정보 등으로 구성된다. 여기서 블렌딩 정보는 두 하위 단계 복합재 형상 간의 교집합 영역에 대한 가중치(*weighting factor*, α) 및 경계면으로 부터의 최단 직교거리를 배개변수로 하는 가중함수(*distance-based weighting function*, w_i) 등으로 구성된다. 이러한 CMC 구성정보를 바탕으로, 최종 복합재 상의 임의의 한 점에 대응하는 재질성분은 유일하게 계산될 수 있다.

*hb-set*은 *hp-set*의 정의와 유사하게 아래 식 (8)과 같이 정의된다.

$$B = (Q, C) = (Geometry(B), Material(B)) \quad (8)$$

위 식 (8)에서 $Q(\subset E^3)$ 는 B-rep 형태로 표현되는 최종형상을 나타내며, $C(Q)(\subset R^n)$ 는 CMC에 의해 최종 형상 Q에 매핑된 재질정보의 이미지 집합을 의미한다.

3.1.1 CMC 정보의 생성

전술한 *hb-set* 정의에 기반하여, 본 장에서는 실질적인 CMC의 생성과정과 그 구성정보를 구체적으로 소개하겠다. Fig. 9는 하위 단계 복합재간에 정의될 수 있는, 3가지의 이방성 합집합 불리언 작업 및 불리언 복합재들을 도시하고 있다.

Fig. 9에 보여진 3가지 결과 전체에서, 하위 단계 복

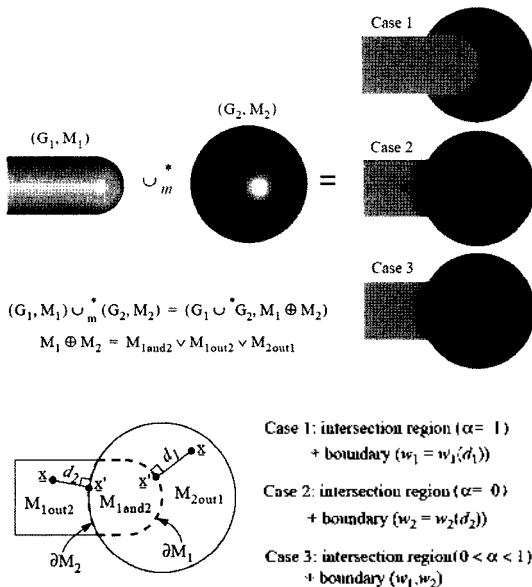


Fig. 9. Three different hb-sets constructed by material union operation.

합재간의 경계면에서 재질성분의 연속성이 보장됨을 확인할 수 있다. G_i, M_i 은 각각 i 번째 하위 단계 복합재의 기하학적 형상정보 및 재질정보를 나타내고 있다. n 개의 주성분 재질을 고려할 때, 각각의 재질정보는 아래 식 (9)와 같은 합성 매핑으로 표현될 수 있다.

$$M_1 = H_1 \cdot F_1 \cdot T_1 = \{\phi_{11}, \phi_{12}, \dots, \phi_{1n}\} \quad (9-1)$$

$$M_2 = H_2 \cdot F_2 \cdot T_2 = \{\phi_{21}, \phi_{22}, \dots, \phi_{2n}\} \quad (9-2)$$

위 식 (9)에서 ϕ_j 는 i 번째 매핑의 j 번째 성분함수들 의미하며, n 은 주성분 재질의 개수를 나타낸다.

Fig. 9에서 이방성 재질 작업자 $M_1 \oplus M_2$ 는 3가지 성분 작업자 $M_{land2}, M_{1out2}, M_{2out1}$ 들의 논리곱(\vee)으로 정의된다. $\alpha (0 < \alpha \leq 1)$ 는 교집합 영역의 재질 성분을 표현하기 위한 가중치이며, $w_i (i = 1, 2)$ 는 i 번째 경계면으로 부터의 최단 직교거리(d_i)를 매개변수로 사용하는 경계면 블렌딩을 위한 가중함수를 의미한다. 이 가중 함수 역시 0과 1사이에서 그 값이 정의된다. 이방성 재질 작업자(\oplus)의 3가지 성분 작업자는 아래 식 (10)과 같이 정의된다.

$$M_{land2} = \alpha \cdot M_1(\underline{x}) + (1 - \alpha) \cdot M_2(\underline{x}) \quad \text{for } \underline{x} \in (G_1 \cap^* G_2) \quad (10-1)$$

$$M_{1out2} = w_2 \cdot M_1(\underline{x}) + (1 - w_2) \cdot \partial M_2(\underline{x}') \quad \text{for } \underline{x} \in (G_1 -^* G_2) \quad (10-2)$$

$$M_{2out1} = (1 - w_1) \cdot \partial M_1(\underline{x}') + w_1 \cdot M_2(\underline{x}) \quad \text{for } \underline{x} \in (G_2 -^* G_1) \quad (10-3)$$

위 식 (10)에서 \underline{x}' 는 임의의 점 \underline{x} 로부터 최단 거리에 있는 교집합 영역의 경계면 상의 점을 의미하며, $\partial M_i (i = 1, 2)$ 는 \underline{x}' 에서의 재질성분을 나타낸다.

3.1.2 이방성 불리언 작업

본 절에서는 복합재의 CSG기반 표현을 위해서 제안된 이방성 불리언 작업들을 소개하고자 한다. 여기서 소개되는 이방성 불리언 작업들은 CSG 모델링에서와 같이 최종적으로 생성되는 기하학적 형상에 따라 구분된다.

• 이방성 합집합 불리언 작업

이방성 합집합 불리언 작업은 Fig. 9에서와 같이 아래 식 (11)로 정의되며, 이방성 재질 작업자 \oplus 는 3.1.1절에서 이미 소개되었다.

$$(G_1, M_1) \cup^* (G_2, M_2) = (G_1 \cup^* G_2, M_1 \oplus M_2) = (G_1 \cup^* G_2, M_{land2} \vee M_{1out2} \vee M_{2out1}) \quad (11)$$

• 이방성 교집합 불리언 작업

$$(G_1, M_1) \cap^* (G_2, M_2) = (G_1 \cap^* G_2, M_1 \oplus M_2) = (G_1 \cap^* G_2, M_{land2}) \quad (12)$$

• 이방성 차집합 불리언 작업

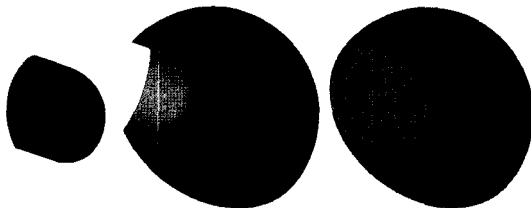
$$(G_1, M_1) -^* (G_2, M_2) = (G_1 -^* G_2, M_1 \oplus M_2) = (G_1 -^* G_2, M_{1out2}) \quad (13)$$

• 이방성 파티션(partition) 불리언 작업

$$(G_1, M_1) /^* (G_2, M_2) = (G_1, M_1 \oplus M_2) = (G_1, M_{land2} \vee M_{1out2}) \quad (14)$$

이 작업은 기하학적 형상만을 고려하는 CSG 모델링에서는 존재하지 않지만, 이방성 재질을 다루는 복합재 모델링에서는 기존 모델 영역의 일부분에 새로운 재질성분을 부여할 수 있는 유용한 불리언 작업이다.

Fig. 10은 각각 이방성 교집합, 차집합, 파티션 작업에 의해 생성될 수 있는 최종 복합체들을 보여주고 있다. 특히 Fig. 10(b)에서와 같이 이방성 차집합 작업을 행하면 얇은 FGM 층을 최종 복합체에 생성할 수 있다.



(a) Intersection (b) Difference (c) Partition

Fig. 10. Material intersection, difference, and partition.

3.2 오브젝트 복합체(h-object)

지금까지 소개한 프리미티브 복합체(hp-set) 및 불리언 복합체(hb-set)의 정의에 기반하여, 최종적으로 일반화된 오브젝트 복합체(h-object)를 정의 한다. 복합체 모델링을 위해 본 논문에서 제안하는 방법은 CSG 및 분해(decomposition)를 혼합한 표현법이다. 이러한 혼합적 표현법을 사용함으로써 CSG모델링의 단점인 불필요한 아인트리의 성장을 억제할 수 있다. 혼합적 표현법에 기초하여, 일반화된 오브젝트 복합체 O는 아래 식 (15)와 같이 유한한 개수의 프리미티브 복합체(hp-sets)와 불리언 복합체(hb-sets)의 합집합으로 정의될 수 있다.

$$O = \{P_1, \dots, P_a, B_1, \dots, B_b\}$$

$$= \{(G_1, M_1), \dots, (G_a, M_a), (Q_1, C_1), \dots, (Q_b, C_b)\}$$

(15)

$$G_i \cap^* G_j = \Phi \quad i \neq j, 1 \leq i, j \leq a$$

$$Q_i \cap^* Q_j = \Phi \quad i \neq j, 1 \leq i, j \leq b$$

위 식 (15)에서 P와 B는 각각 hp-set과 hb-set을 나타내며, 각각의 hp-set과 hb-set 상호 간의 교집합 영역의 부피는 제로가 되어야 한다.

3.3 오브젝트 복합체를 위한 모델링 작업

본 절에서는 일반화된 오브젝트 복합체를 위한 모델링 작업들을 소개한다.

3.3.1 오브젝트 복합체를 위한 이방성 불리언 작업

업들을 일반화하여 아래의 식 (16)과 같이 오브젝트 복합체 O에도 적용할 수 있다.

$$O_1(Operation)O_2 = \bigvee_{i,j} \left\{ \begin{array}{l} P_{1i}(Operation)P_{2j} \quad 1 \leq i \leq a, 1 \leq j \leq c \\ P_{1i}(Operation)B_{2j} \quad 1 \leq i \leq a, 1 \leq j \leq d \\ B_{1i}(Operation)P_{2j} \quad 1 \leq i \leq b, 1 \leq j \leq c \\ B_{1i}(Operation)B_{2j} \quad 1 \leq i \leq b, 1 \leq j \leq d \end{array} \right\} \quad (16)$$

where $O_1 = \{P_{11}, \dots, P_{1a}, B_{11}, \dots, B_{1b}\}$
 $O_2 = \{P_{21}, \dots, P_{2c}, B_{21}, \dots, B_{2d}\}$

위 식 (16)의 (Operation)은 합집합, 교집합, 차집합, 파티션 등의 모든 이방성 불리언 작업들을 포함된다.

3.3.2 점합작업(join operation)

전술한 바와 같이 CSG 및 분해(decomposition)를 혼합한 표현법을 지원하기 위해 아래와 식 (17)과 같은 점합작업을 새롭게 정의한다.

$$O_1 \vee O_2 = O_3 \quad (17)$$

$$= \{P_{11}, \dots, P_{1a}, P_{21}, \dots, P_{2c}, B_{11}, \dots, B_{1b}, B_{21}, \dots, B_{2d}\}$$

$$= \{P_{31}, \dots, P_{3(a+c)}, B_{31}, \dots, B_{3(b+d)}\}$$

만약 최종 오브젝트 복합체 O₃에서 두 hp-set P_i, P_j의 재질성분 매핑 M_i, M_j가 동일하다면, 두 hp-set은 하나의 hp-set으로 통합될 수 있다. 이러한 경우를 고려한 두 hp-set간의 점합작업은 아래의 식 (18)과 같이 정의된다.

$$P_i \vee P_j = (G_i, M_i) \vee (G_j, M_j) \quad i \neq j \quad (18)$$

$$= \begin{cases} (G_i \cup^* G_j, M_j) & \text{if } M_i = M_j \\ \{(G_i, M_i), (G_j, M_j)\} & \text{if } M_i \neq M_j \end{cases}$$

4. 모델 계층도 및 데이터 구조

4.1 모델 계층도(model hierarchy)

Fig. 11은 본 논문에서 제안한 CSG 기반 복합체 모델링 방법에 의해 생성된 복합체 모델의 계층도를 보여주고 있다. 이 모델은 최종적으로 하나의 hp-set과 2개의 hb-set에 점합작업을 수행하여 생성되었다. 각각의 hb-set은 2개의 하위 단계 h-object들간의 이방

성 합집합 불리언 작업에 의해 구성되었다. 최종 복합체 상의 재질성분은 6개의 프리미티브 복합체로의 순환적 하강 방법(recursive descent algorithm)을 이용하여 계산할 수 있다. 최종 복합체는 6개의 프리미티브 복합체들 간에 5번의 이방성 불리언 작업을 거쳐 생성할 수도 있지만, 전술한 바와 같이 불필요한 이진트리 성장을 막기 위해 Fig. 11과 같은 점합작업을 거쳐서 생성하였다.

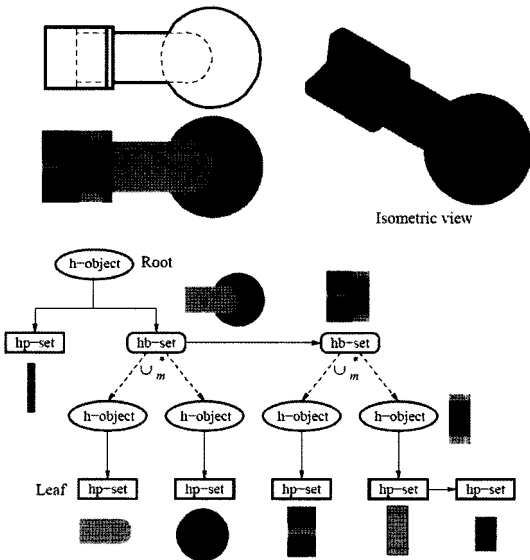


Fig. 11. Model hierarchy in CSG-based representation.

4.2 데이터 구조

4.2.1 hp-set의 데이터 구조

Fig. 12는 본 논문에서 제안된 프리미티브 복합체의 컴퓨터 표현을 위해 도입된 데이터 구조를 보여주고 있다. hp-set을 위한 데이터 구조는 널리 알려진 radial-edge^[9] 데이터 구조에 기반한 ACIS 형상모델러^[10] (Spatial Technology, Inc.)로부터 확장하여 구성하였다. 즉, Radial-edge 구조에서 제공되는 토폴로지 엔티티(Body, Lump, Shell, Face, Loop, Edge, Vertex)에 재질정보(MATL, 매핑 M)를 추가하여 hp-set의 기본 데이터 구조를 완성하였다.

4.2.2 h-object의 데이터 구조

Fig. 13에서와 같이 h-object는 유한한 개수의 hp-set과 hb-set들이 상호 연결된 합집합으로 구성된다. 전술한 바와 같이 하나의 hb-set은 B-rep 형태의 최종 형상, 교집합 영역을 위한 가중치, 적용된 특정 이방

성 불리언 작업, 2개의 하위 단계 h-object 포인터(pointer) 및 경계면에서의 재질성분 블렌딩을 위한 가중합수 등의 정보를 담고 있다.

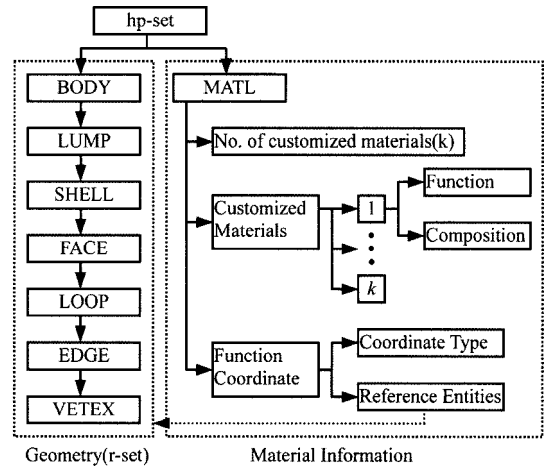


Fig. 12. Data structure for hp-set.

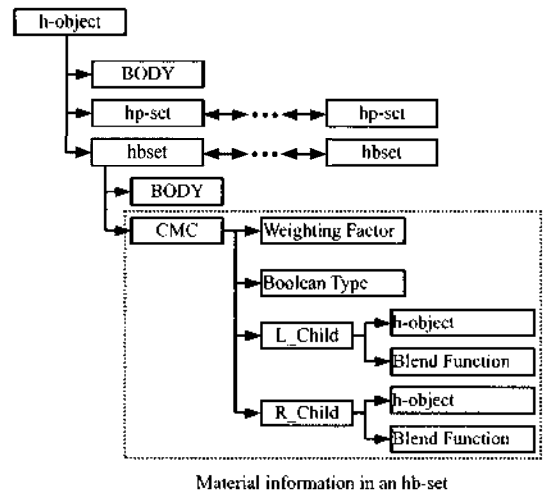


Fig. 13. Data structure for h-object.

5. 적용 예

복합체의 CSG 기반 모델링을 위한 원형(prototype)으로 ACIS(Spatial Technologies Inc.) 커널 루틴^[11,12]들과 C++ language를 사용하여 복합체 형상모델러^[8]의 원형을 구현하였다. 형상 및 재질성분 설계를 위한 GUI는 OpenGL 라이브러리를 이용하여 PC 환경에서 실행되도록 구현하였다. 본 장에서는 제안된 CSG 기

반 모델링 방법에 의해 생성된 2개의 적용 예를 소개 하도록 하겠다.

5.1 생체공학 팔(biomechanical arm)

Fig. 14는 생체공학 팔의 원형을 CSG 기반 모델링 방법으로 생성하는 과정을 도시하고 있다. 인공 팔의 댐핑(damping) 특성 및 내피로 파괴(anti-fatigue fracture) 특성을 향상시키기 위해 2개의 관절에 유연한 재질과 딱딱한 재질 간의 FGM 설계를 도입하였다. 각각의 관절은 인간 팔의 어깨와 팔꿈치에 해당한다. 최종 인공 팔 복합재는 2번의 이방성 합집합 불리언 작업을 수행하여 생성하였다. Fig. 14에서 부분 형상 $G_{3out(12)}$ 의 원래 재질성분은 $M_{3out(12)}$ (밝은색)이지만, $d_2 > 6$ 인 영역에서는 ∂M_{12} (어두운색)로 변하게 된다($w_2 = 0$).

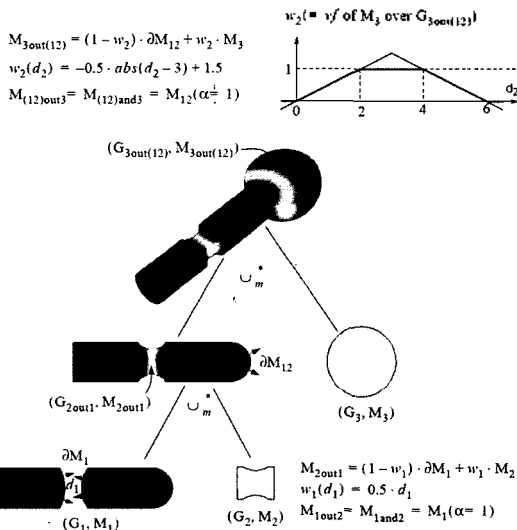


Fig. 14. Construction of a biomechanical arm.

5.2 피스톤 헤드

Fig. 15는 다른 적용 예로 MMC(Metal Matrix Composite) 크라운을 가지는 피스톤 헤드 모델의 생성 과정 및 모델 계층도를 도시하고 있다. 자동차 산업 분야에서 디젤 피스톤의 크라운 재질로 MMC가 응용되고 있다^[12]. 최종 복합재 모델은 2개의 하위 단계 복합재에 이방성 파티션 불리언 작업을 수행하여 생성하였다. 특히 첫번째 프리미티브 복합재는 스틸 재질 위에 열보호 층으로써 지르코늄 성분의 FGM코팅막을 형성하고 있다.

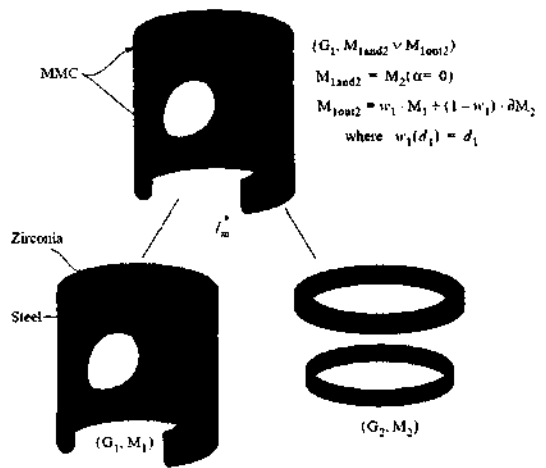


Fig. 15. Piston head embedding Metal Matrix Composite (MMC) crown.

6. 결 론

본 논문에서는 효과적인 복합재 모델링을 위해 CSG 기반 표현법 및 그 데이터 구조를 제안하였다. 특히 제안된 방법은 각각의 이방성 형상 경계면에서 재질 성분의 연속성을 보장하는데 초점을 맞추고 있다. CSG 모델링과 유사하게 먼저 형상 독립 재질성분 함수, 형상 종속 재질성분 함수 등을 이용하여 프리미티브 복합재를 생성한 후 새롭게 고안된 이방성 불리언 작업들을 적용하여 한 층 복잡한 복합재를 생성할 수 있다. 또한 CT/MRI/Ultrasonic 이미지와 같은 스캔 데이터^[13]를 복셀형태로 입력 받아 처리할 수 있는 다중해상도(multi-resolution)^[14] CSG 표현도 부분적으로 가능하며 현재 그 기능을 확장 중에 있다.

공학적 응용분야에서, 복합재 모델링의 궁극적 목표는 복합재의 형상 및 재질성분을 동시에 최적화 시키는 데 있다. 이러한 최적설계는 복합재 모델의 유한요소 해석을 거쳐 얻을 수 있으므로, 해석을 위한 유한요소 생성 알고리즘의 개발이 절실히 요구되고 있다.

현재 용사법(thermal spraying), CVD, PVD 등의 방법을 이용한 코팅 혹은 박막 형식의 복합재 제작이 널리 사용되고 있으며, DMD, SDM, 3DP와 같은 적층조형 방법을 이용한 3차원 복합재의 제작에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서 제안된 방법은 위의 모든 경우에 대해서 모델링이 가능하지만, 완전한 3차원 복합재의 제작방법이 실용화 된다면, 제안된 방법을 이용한 모델링, 해석, 나아가 실제 제작

까지도 가능하리라 생각된다. 향후 골프 샤프트 등과 같은 실제 응용 가능한 복합체에 대해서 모델링 및 해석을 수행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00087).

참고문헌

1. Rajagopalan, S., Goldman, R., Shin, K. H., Kumar, V., Cutkosky, M. and Dutta, D., "Representation of Heterogeneous Objects during Design, Processing and Freeform-Fabrication", *Materials and Design*, Vol. 22, No. 3, pp. 185-197, 2001.
2. Jackson, T. R., Liu, H., Patrikalakis, N. M., Sachs, E. M. and Cima, M. J., "Modeling and Designing Functionally Graded Material Components for Fabrication with Local Composition Control", *Materials and Design*, Vol. 20, No. 2/3, pp. 63-75, 1999.
3. Wu, Z., Seah, H. S. and Lin, F., "NURBS-Based Volume Modeling", *International Workshop on Volume Graphics*, Swansea, pp. 321-330, 1999.
4. Kumar, V. and Dutta, D., "An Approach to Modeling and Representation of Heterogeneous Objects", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 120, No. 4, pp. 659-667, 1998.
5. Samanta, K. and Koc, B., "Feature-based Design

and Material Blending for Free-form Heterogeneous Object Modeling", *Computer-Aided Design*, Vol. 37, No. 3, pp. 287-305, 2005.

6. Liu, H., Maekawa, T., Patrikalakis, Sachs, E. M. and Cho, W., "Methods for Feature-based Design of Heterogeneous Solids", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 12, pp. 1141-1159, 2004.
7. Qian, X. and Dutta, D., "Feature-based Design for Heterogeneous Objects", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 12, pp. 1263-1278, 2004.
8. 신기훈, 김주환, "복합체 형상의 FEA 기반 설계를 위한 통합 CAD 시스템", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제10권, 제5호, pp. 328-338, 2005.
9. Weiler, K. J., "The Radial Edge Structure: A Topological Representation for Non-manifold Geometric Modeling", In M. J. Wozny, H. McLaughlin, and J. Encarnacao, editors, *Geometric Modeling for CAD Applications*, pp. 3-36, Elsevier Science Publishers, Holland., 1986.
10. ACIS Geometric Modeler: Application Guide, Spatial Technology Inc., 1995
11. 이상현, "주요 솔리드 모델링 커널의 소개", 한국 CAD/CAM 학회지, 제7권, 제2호, 2001.
12. Donomoto, T., Miura, N., Funatani, K. and Miyake, N., SAE Tech. Paper No. 83052, Detroit, Michigan, 1983.
13. 장순석, 양해장, 이제형, "3차원 레이저 스캐닝 점 좌표 데이터로부터 CAE 유한요소 배치 생성 알고리즘 개발", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제10권, 제1호, pp. 70-75, 2005.
14. 최동혁, 김대완, 이건우, "특징형상 변환을 이용한 B-rep 모델의 다중해상도 구현", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 121-130, 2002.



신 기 훈

1990년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1992년 서울대학교 기계설계학과 석사
 2002년 Univ. of Michigan, 기계공학과 박사
 1990년 3월~2005년 2월 (주)대우일렉트로닉스 책임연구원
 2005년 3월~현재 서울산업대학교 기계공학과 전임강사

관심분야: CAD/CAM, Rapid Prototyping, Heterogeneous Objects, Digital Manufacturing



이 진 구

1983년 연세대학교 기계공학과 학사
 1990년 Univ. of Michigan, 기계공학과 석사
 1992년 Univ. of Michigan, 기계공학과 박사
 1983년 1월~1998년 3월 (주)대우전자 책임연구원
 1998년 4월~현재 서울산업대학교 기계공학과 부교수

관심분야: CAD, Design Optimization