

## 기능성 경사복합재의 적층조형을 위한 분해기반 공정계획

신기훈\*, 김성환\*\*

### Decomposition-based Process Planning for Layered Manufacturing of Functionally Gradient Materials

Shin, K. H.\* and Kim, S. H.\*\*

#### ABSTRACT

Layered manufacturing (LM) is emerging as a new technology that enables the fabrication of three dimensional heterogeneous objects such as Multi-materials and Functionally Gradient Materials (FGMs). Among various types of heterogeneous objects, more attention has recently paid on the fabrication of FGMs because of their potentials in engineering applications. The necessary steps for LM fabrication of FGMs include representation and process planning of material information inside an FGM. This paper introduces a new process planning algorithm that takes into account the processing of material information. The detailed tasks are discretization (i.e., decomposition-based approximation of volume fraction), orientation (build direction selection), and adaptive slicing of heterogeneous objects. In particular, this paper focuses on the discretization process that converts all of the material information inside an FGM into material features like geometric features. It is thus possible to choose an optimal build direction among various pre-selected ones by approximately estimating build time. This is because total build time depends on the complexity of features. This discretization process also allows adaptive slicing of heterogeneous objects to minimize surface finish and material composition error. In addition, tool path planning can be simplified into fill pattern generation. Specific examples are shown to illustrate the overall procedure.

**Key words :** FGMs, Layered Manufacturing, Process Planning, Discretization, Adaptive Slicing

#### 1. 서 론

현재까지는 분말야금법(powder metallurgy), 금속용사(thermal spraying), 화학증착법(chemical vapor deposition), 진공증착법(evaporation deposition)과 같은 방법에 의해 주로 코팅 형태의 단순한 복합재를 생산할 수 있었다. 하지만 최근에 들어 활발히 연구되고 있는 적층조형 방식(Layered Manufacturing, LM)은 SFF(Solid Freeform Fabrication)라고도 일컬어 지는데, 컴퓨터의 제어 아래 동시에 여러 가지 재질을 미세한 점의 형태로 쌓아서 원하는 형상 및 재질성분을

가진 3차원 복합재를 생산할 수 있는 방법으로 부각되고 있다. 특히 적층조형 방식을 이용하면, 기하학적 형상을 따라서 재질성분 및 미세결정구조가 연속적으로 변화하는 기능성 경사 복합재(Functionally Gradient Materials, FGMs)의 생산이 가능하며, 각종 진기장치 및 센서 등을 최종 형상의 내부에 삽입하여 일체로 제작하는 것도 가능하다. 여기서의 적층조형 방식은 시제품의 생산에 주로 사용되는 록속조형(Rapid Prototyping, RP) 방법으로서가 아니라 실제 복합재를 생산할 수 있는 방법으로 다루고자 한다.

현재 미시간 대학의 DMD(Direct Metal Deposition)<sup>[1]</sup>, 스탠포드 대학과 카네기 멜론 대학의 SDM(Shape Deposition Manufacturing)<sup>[2]</sup>, MIT의 3DP(Three Dimensional Printing)<sup>[3]</sup>, 텍사스 오스틴 대학의 SLS(Selective Laser Sintering)<sup>[4]</sup> 등을 이용한 복합재의 적층조형 연구가 활발히 진행되고 있다.

\*종신회원, 서울산업대학교 기계공학과  
\*\*교신저자, 종신회원, 서울산업대학교 기계설계자동화공학부  
- 논문투고일: 2005. 08. 30  
- 심사완료일: 2006. 01. 26

적층조형 방식은 컴퓨터 기반 기술로 최종 형상의 CAD 모델에 매우 의존적이다. 그러므로 적층조형 머신을 구동하기 위해 필요한 모든 생산정보를 제공하기 위해서는 CAD 모델을 처리하는 공정이 필요한데 우리는 이 작업을 공정계획(process-planning)이라고 부른다<sup>15</sup>. 현재 단일재(homogeneous object)로 구성된 형상의 적층조형을 위한 공정계획은 적층방향을 선택하는 공정(orientation), 지지구조를 생성하는 공정(support generation), 외곽 형상을 슬라이싱(slicing) 하는 공정, 그리고 마지막으로 슬라이싱된 각 층(layer)에서의 툴 경로를 생성하는 공정 등으로 구성된다. 하지만, 이러한 작업들은 단순히 제품의 기하학적 형상만을 고려할 뿐, 제품 내부의 재질성분 변화는 고려하지 않는다. 그러므로, 복합재의 적층조형을 위한 공정계획에는 부가적으로 제품 내부의 재질정보를 분석하여 조형 가능한 정보로 변환하는 작업이 추가되어야만 한다.

현재까지 제안된 복합재의 적층조형을 위한 공정계획 방법으로 먼저 Kumar 등<sup>16</sup>은 다중 복합재(multi-materials)를 위한 적응 슬라이싱(adaptive slicing) 방법을 제안하였다. 그리고 Wu 등<sup>17</sup>은 3DP 머신을 위한 dithering 행렬을 이용하는 디지털 half-toning 기술을 제안하였다. Park 등<sup>18</sup>은 각 층에서 재료성분비가 같은 툴 경로를 찾기 위한 marching square 알고리즘을 제안하였다. Zhou<sup>19</sup> 또한 기능성 경사복합재의 적층조형을 위한 툴 경로 생성에 관한 연구를 수행하였다. 하지만 Kumar 등의 연구는 다중 복합재만 고려하였기 때문에 기능성 경사복합재에는 적합하지 않으며, Wu 등의 연구는 3DP 머신에만 적용할 수 있으며, Park 등의 연구는 툴 경로 생성에만 초점이 맞추어져 적층방향의 선정이나 슬라이싱 방법에 대해서는 다루지 않았었다.

복합재의 적층조형을 위한 공정계획은 복합재의 CAD 모델링 방법에 의존적이므로, 본 논문에서는 이전의 연구에서 제안된 “복합재의 CSG기반 표현법”<sup>10</sup>을 활용한 “분해기반 공정계획”을 소개한다. 본 논문에서 제안된 공정계획 방법의 주된 아이디어는 먼저 부피퍼센트 근사화 과정(discretization)을 거쳐 연속적인 재질성분 변화가 존재하는 기능성 경사복합재 모델을 다중 복합재 모델로 변환한 후 Kumar 등이 제안한 적응 슬라이싱 알고리즘을 응용하여 각각의 슬라이스 데이터를 얻는 것이다.

Fig. 1은 복합재의 적층조형을 위한 공정계획 방법의 전체적인 흐름도를 보여주고 있다. 본 논문에서는 부피퍼센트 근사화, 적층방향의 선정 및 적응 슬라이

싱 방법이 제안되었으며, 실제적인 공구경로 및 머신 코드의 생성에는 상용 소프트웨어인 surfcam을 사용하였다. 제안된 방법은 다수의 재질을 동시에 공급할 수 있는 멀티 powder feeder와 mixer를 가지는 DMD나 SDM 장비를 염두에 두고 개발되었으며, Fig. 2에서 DMD 머신의 개략도를 보여주고 있다. DMD 머신은 다수의 재질이 혼합되어 공급되는 파우더를 레이저로 용융하여 substrate에 쌓는 방식으로 임의의 3차원 복합체를 생산할 수 있다. 그러므로 같은 재질성분을 가지는 영역은 동일한 성분으로 혼합된 파우더를 이용하여 적층하게 된다.

먼저 2장에서는 제안된 공정계획 방법의 기반이 되는 “복합재의 CSG기반 표현법”에 대해 간략히 소개하고, 이후의 장에서는 제안된 부피퍼센트 근사화 과정 및 적층방향 선정과 적응 슬라이싱에 대해서 예를 들어 설명한다. 마지막으로 요약과 향후 연구과제에 대해서 간단히 설명한다.

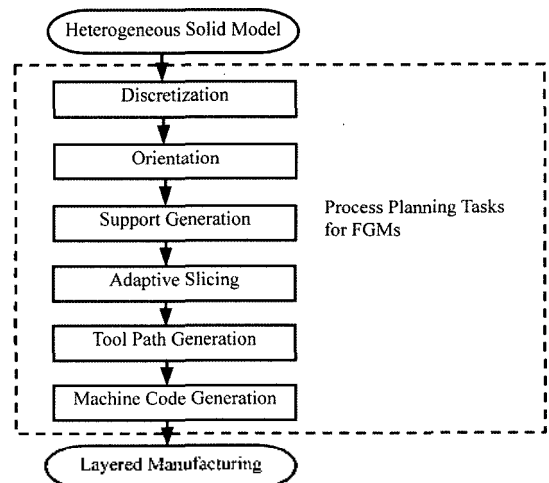


Fig. 1. Process planning for layered manufacturing of functionally gradient materials.

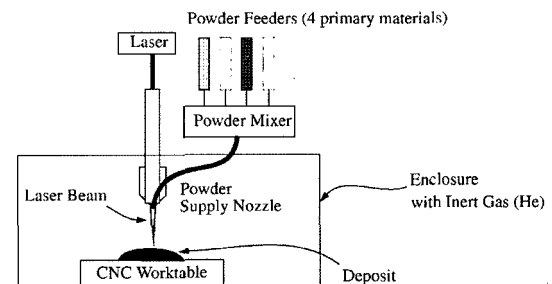


Fig. 2. Schematic of DMD.

## 2. 복합재의 CSG 기반표현

CSG 형상 모델링과 마찬가지로 상위 단계의 복합재는 단순한 복합재(프리미티브 복합재 혹은 하위 단계의 복합재)들 간의 불리언 작업(Boolean operation)으로 표현한다<sup>[10]</sup>. 특히 이 방법은 각각의 이방성 형상 경계면에서 재질성분의 연속성을 보장할 수 있으므로 FGM 모델링에 적합한 표현법이다.

제안된 표현법은 CSG모델링의 단점인 불필요한 이진드리의 성장을 억제하기 위해 CSG 표현법과 분해(decomposition) 기반 표현법을 혼합한 방법이다. 이러한 혼합적 표현법에 기초하여, 일반화된 오브젝트 복합재  $O$ 는 아래 식 (1)과 같이 유한한 개수( $a, b$ )의 프리미티브 복합재( $P$ )와 불리언 복합재( $Q$ )의 합집합으로 정의된다. 여기서 복합재  $O$ 는  $n$ 개의 주성분 재질(primary materials)로 구성된다고 가정한다.

$$\begin{aligned}
 O &= \{P_1, \dots, P_a, B_1, \dots, B_b\} & (1) \\
 &= \{(G_1, M_1), \dots, (G_a, M_a), (Q_1, C_1), \dots, (Q_b, C_b)\} \\
 &G_i \cap G_j = \Phi \quad i \neq j, 1 \leq i, j \leq a \\
 &Q_i \cap Q_j = \Phi \quad i \neq j, 1 \leq i, j \leq b \\
 &G_i \cap Q_j = \Phi \quad 1 \leq i \leq a, 1 \leq j \leq b
 \end{aligned}$$

위 식 (1)에서  $G$ 와  $Q(C \in E^3)$ 는 각각 B-rep 형태로 표현되는  $P$ 와  $B$ 의 기하학적 형상을 나타내며,  $M(G)$ 와  $C(Q)(C \in R^n)$ 는 형상  $G$ 와  $Q$ 에 매핑된 재질성분의 이미지 집합을 의미한다. 단, 각각의  $G$ 와  $Q$  상호 간의 교집합 영역의 부피는 제로가 되어야 한다.

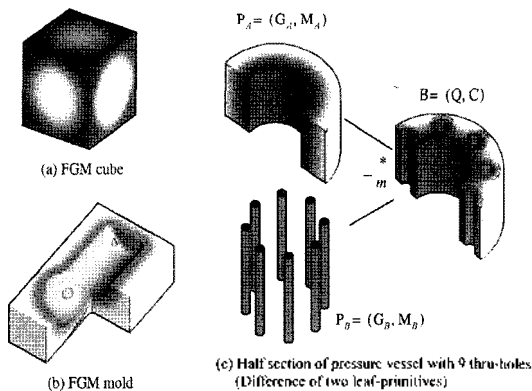


Fig. 3. Examples of FGMs.

Fig. 3-(a), (b)는 프리미티브 복합재들로서, 각각 FGM 큐브와 FGM 몰드 틀을 보여주고 있다. FGM 큐브에서 재질성분은 구좌표계 상의 반경방향으로 변

화하며, FGM 몰드 틀에서는 캐비티 곡면으로부터의 거리를 매개변수로 하는 재질성분 함수가 정의되었다. 즉, 캐비티 면으로부터의 거리에 따른 재질성분을 달리하여 열관성(thermal inertia)을 줄임으로써, 냉각 시간을 최소화하고 사출 주기를 향상시킬 수 있다. 또한 캐비티 면의 마모를 최소화 하면서 요구되는 강도를 가지게 할 수도 있다<sup>[11]</sup>. Fig. 3-(c)는 하나의 중심홀과 8개의 주변홀을 가지는 FGM 압력관 모델을 보여주고 있다. 최종 모델은 두 프리미티브 복합재간의 불리언 차집합 작업에 의해 생성되었다. 복합재의 CSG기반 표현법의 자세한 내용은 참고문헌[10]을 참조하기 바란다.

## 3. 부피퍼센트 근사화(Discretization)

전술한 바와 같이, 현재의 적층조형을 위한 공정계획으로는 FGM의 기하학적 형상만을 처리할 수 있을 뿐, 내부의 재질성분의 변화는 다룰 수가 없다. 그러므로 재질성분의 변화를 처리할 수 있는 추가적인 작업이 필요하다. 본 논문에서는 연속적인 재질성분의 변화를 가지는 FGM 모델을 계단모양(stepwise)의 재질성분 변화를 가지는 다중 복합재 모델로 변환하는 부피퍼센트 근사화(discretization) 과정을 도입하였다. 즉, 적층조형 머신들이 한번에 표현할 수 있는 재질성분비에는 한계가 있기 때문에 이러한 근사화 과정(예 0.01-1%, 0.05-5%, 0.1-10%, 0.2-20%, etc.)은 공정계획에 반드시 포함되어야 한다.

복합재의 CSG 기반 표현법에서의 근사화 과정은 모델을 구성하는 이진드리 상에 존재하는 모든 프리미티브 복합재( $P$ )와 불리언 복합재( $B$ )를 근사화 시킴으로써 수행된다. 구체적으로 프리미티브 복합재( $P$ )에 정의된 재질성분 함수(material composition function) 혹은 불리언 복합재( $B$ )에 정의된 경계면 블렌딩 가중 함수(distance-based weighting function)를 허용 가능한 오차 범위 내에서 계단모양의 불연속 함수로 바꾸어 하나의 FGM 모델을 다수의 다중 복합재 모델로 분해하는 과정이 근사화 과정이다.

### 3.1 프리미티브 복합재의 근사화

프리미티브 복합재의 근사화 과정의 첫 단계는 모델 내부에 정의된 재질성분 함수를 Fig. 4와 같이 허용 가능한 오차 범위 내에서 계단모양의 불연속 함수로 변환하는 과정이다.

가장 일반적인 경우로  $n$ 개의 주성분 재질을 고려하면  $n-1$ 개의 재질성분 함수가 아래 식 (2)와 같이 매

개변수벡터 ( $\underline{u}$ ) 를 인수로 정의되어야 한다. 실린더 좌표계에서 매개변수벡터는  $\underline{u} = [r, \theta, z]^T$ 이며, Fig. 3-(b)의 몰드 툴 모델에서는 캐비티 면으로부터의 거리  $d$ 가 재질성분함수의 매개변수가 된다.

$$F(\underline{u}) = [f_1, \dots, f_{n-1}, f_n]^T = \left[ f_1, \dots, f_{n-1}, 1 - \sum_{i=1}^{n-1} (1-f_i) \right] \quad (2)$$

하지만,  $n$ 개의 함수를 동시에 근사화 하는 과정은 수학적으로 매우 복잡하다. 그러므로 본 논문에서는 복합재 모델의 주성분 재질 중 가장 지배적인 재질 (dominant material)에 해당하는 하나의 재질성분 함수만을 근사화 시키는 방법을 사용하였다. Fig. 4는 근사화 정도(resolution)  $r = 0.2(20\%)$ 로 비선형 재질성분 함수를 근사화 시키는 ceil(floor) 근사화 및 중간 근사화 (intermediate discretization) 과정을 보여주고 있다. 근사화에 의해 발생하는 실제 오차( $\epsilon_p$ )는 ceil(floor) 근사화의 경우  $\epsilon_p = r$ 이고, 중간근사화의 경우  $\epsilon_p = r/2$ 이므로 본 논문에서는 특별한 언급이 없는 한 중간근사화를 사용한다.

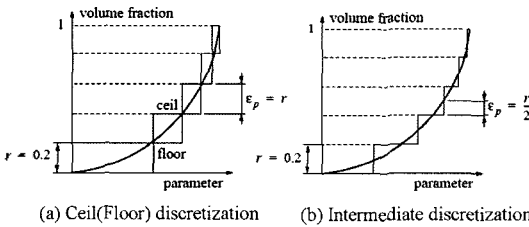


Fig. 4. Two discretization of a material composition function.

3.1.1 매개변수의 계산

각각의 재질성분 함수의 값은 0과 1사이로 제한되며, 그들의 합은 항상 1이 되어야 한다. 예로 재질성분함수 집합이  $F = [f_1, f_2]^T$ 이고  $f_1(\underline{u}) = 0.5u_1, f_2 = (1-f_1)$  인 경우를 고려하면, 매개변수의 유효 영역은  $0 \leq u_1 \leq 2$ 이 된다. 이러한 정보를 이용하면 복합재 모델의 형상이 분해되어야 하는 매개변수 값을 유일하게 계산할 수 있다.  $n$ 개의 주성분 재질을 고려하는 일반적인 경우, 임의의 재질성분 점  $\hat{v}$ 에 상응하는 매개변수  $\underline{u}$ 를 계산하는 지배방정식 집합  $G$ 는 아래 식 (3)과 같이 된다.

$$G(\underline{u}) = F(\underline{u}) - \hat{v} = 0 \quad (3)$$

위 식에서  $G = [g_1, g_2, \dots, g_n]^T, F = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T, \hat{v} = [\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots, \hat{v}_n]^T$ 이며,  $\hat{v}_d$ 는 지배재질의 부피퍼센트를 의미한다.

본 논문에서는 식 (3)의 해를 단순화 시키기 위하여 매개변수 벡터의 차원을  $\dim(\underline{u}) = 1$ 로, 지배재질의 부피퍼센트  $\hat{v}_d$ 만을 고려한다고 가정하였다. 중간근사화 방법을 사용하면, 부피퍼센트 근사화 스텝 수  $n_s$ 와  $i$ 번째 스텝에서의 지배재질의 부피퍼센트 ( $\hat{v}_d$ )는 아래 식 (4)와 같이 된다.

$$n_s = \text{int}(1/r) \quad (4-1)$$

$$(\hat{v}_d)_i = \frac{2i+1}{2n_s} \quad (0 \leq i < n_s) \quad (4-2)$$

결국, 식 (3)은 아래 식 (5)와 같이 하나의 매개변수를 가지는 방정식으로 단순화된다.

$$g_d(u) = f_d(u) - (\hat{v}_d)_i = 0 \quad (5)$$

위 식 (5)의 해는 Newton-Raphson 법을 사용하여  $g_d(u)$ 가 주어진 허용오차 범위 내로 수렴할 때까지 반복하면 구할 수 있는데  $l+1$ 번째의 반복 단계에서 매개변수  $u^{l+1}$ 은 아래 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$u^{l+1} = u^l + \frac{-g_d(u^l)}{\frac{d}{du}g_d(u^l)} \quad (6)$$

일반적으로 하나의 ( $\hat{v}_d$ )에 대응하는 다수의 매개변수  $u$ 가 존재하기 때문에, 본 논문에서는 Newton-Raphson 반복법을 이진탐색(binary search) 방법과 혼합하여 모든  $u$ 를 찾아낼 수 있도록 하였다.

3.1.2 형상 분해

일단 매개변수  $u$ 가 계산되면 정규화된 불리언 작업

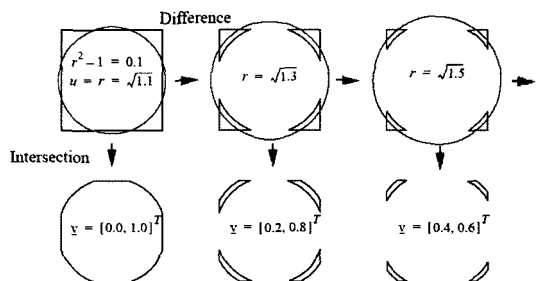


Fig. 5. Discretization by Boolean intersections and differences.

(교집합 및 차집합)을 순차적으로 적용하여 FGM 모델의 형상을 분해하게 된다. 분해 후 만약 같은 재질 성분을 가지는 형상들이 존재한다면 이들은 하나의 형상으로 합치게 된다. Fig. 5는 Fig. 3-(a)의 FGM 큐브의 분해과정을 도시하고 있다. 여기서는 재질성분 함수 집합과 지배재질 성분함수를 사용하였다.

Fig. 6은 근사화 정도  $r = 0.2(20\%)$ 를 사용하여 매개변수 계산 및 불리언 작업을 거쳐서 6개의 단순 복합재 영역을 가지는 다중 복합재 모델로 분해된 FGM 큐브와 FGM 몰드 틀을 보여주고 있다. FGM 몰드 틀의 경우 매개변수는 캐비티 측면으로부터의 거리이며  $d_i = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 와 같이 계산된다. 두 개의 주성분 재질만 고려한다면 분해된 6개 영역의 재질성분은 각각  $\underline{v} = [0.0, 1.0]^T, [0.2, 0.8]^T, [0.4, 0.6]^T, [0.6, 0.4]^T, [0.8, 0.2]^T, [1.0, 0.0]^T$ 의 값을 가진다.

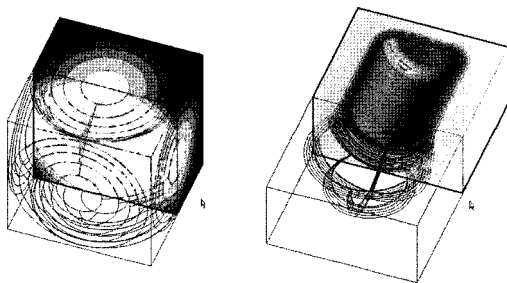


Fig. 6. Discretization of Fig. 3(a),(b).

3.2 불리언 복합재의 근사화

불리언 복합재는 B-rep 형태로 표현되는 최종 형상 및 CMC(Constructive Material Composition)로 명명되는 이진트리 재질정보를 구성요소로 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,  $\alpha$ ) 및 경계면으로부터의 최단 직교거리를 매개변수로 하는 가중함수(distance-based weighting function,  $w(d)$ ) 등으로 구성된다. 이러한 CMC 구성정보를 바탕으로, 최종 복합재 상의 임의의 한 점에 대응하는 재질성분은 유일하게 계산될 수 있다.

불리언 복합재의 근사화 과정은 프리미티브 복합재의 근사화 과정과 매우 흡사하다. 불리언 복합재에서는 재질성분함수(F) 대신 이방성 재질간의 경계면 블렌딩을 위해 정의된 직교거리 매개변수 가중함수를

근사화 하게 된다. Fig. 7은 4개의 주성분 재질을 가지는 불리언 복합재의 모델링 과정과 근사화 과정을 보여주고 있다. Fig. 7-(a)에 보인 것처럼 최종 불리언 복합재 B는 두 개의 프리미티브 복합재  $P_A$ 와  $P_B$  간에 이방성 불리언 합집합을 적용하여 생성하였다.  $P_A$ 는 mat1(빨간색)과 mat2(녹색)로 구성되어 있으며,  $P_B$ 는 mat3(청색)과 mat4(노란색) 사이의 FGM으로 구성되어 있다. 특히  $P_A$ 는 지배적인 프리미티브로 교집합 영역( $G_A \cap G_B$ )의 재질성분을 좌우한다(즉, 교집합 영역의 재질성분은  $P_A$ 의 재질성분인  $M_A$ 가 된다).

Fig. 7-(b)에서는 임의의 점 p에서의 재질성분 벡터 v는 두 재질성분 벡터  $\underline{v}_A, \underline{v}_B$ 와 가중함수  $w(d)$ 에 의해 유일하게 결정됨을 보여주고 있다.  $\underline{v}_A$ 는 점 p에서 가장 가까운 거리에 있는  $P_A$  경계면의 점 p'에서의 재질성분을 의미하며,  $\underline{v}_B$ 는  $P_B$  상의 점 p에서의 재질성분을 각각 나타낸다.

Fig. 7-(c)는 근사화 정도  $r = 0.2(20\%)$ 를 적용한 불리언 복합재 B의 근사화 과정을 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 먼저 두 프리미티브 복합재  $P_A, P_B$ 를 근사화한 후 두 프리미티브 간의 경계면에 적용된 가중함수 블렌딩 영역을 근사화 하여 최종적으로 불리언 복합재 B의 근사화를 완료한다.

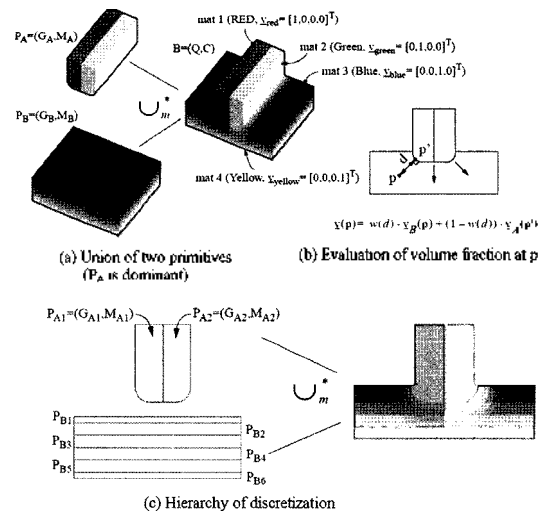


Fig. 7. Model construction and discretization of a heterogeneous Boolean set (B).

구체적인 불리언 복합재의 근사화 알고리즘은 아래와 같으며, Fig. 8에 그 과정이 소개되어 있다.

**Step 1:** 두 프리미티브 복합재  $P_A, P_B$ 를 근사화 한다.

$P_A$ 는 그 자체에 FGM 영역이 존재하지 않으므로 더

이상의 근사화에 의한 영역 분해가 필요하지 않다.  $P_B$  는 mat3(청색)을 지배재질로 설정한 후 근사화 정도  $r=0.2(20\%)$  사용하여 6개의 부영역으로 분해된다. 각 부영역  $P_{B1} \sim P_{B6}$ 의 재질성분은  $\underline{v}_{B1} = [0,0,1,0]^T$ ,  $\underline{v}_{B2} = [0,0,0.8,0.2]^T$ ,  $\underline{v}_{B3} = [0,0,0.6,0.4]^T$ ,  $\underline{v}_{B4} = [0,0,0.4,0.6]^T$ ,  $\underline{v}_{B5} = [0,0,0.2,0.8]^T$ ,  $\underline{v}_{B6} = [0,0,0,1]^T$ 이 된다.

**Step 2:** 지배 프리미티브  $P_A$  상의 경계면(reference boundary)들을 찾아낸다

경계면이란 Fig. 8-(a)에서와 같이 블렌딩 영역(blending zone,  $G_B - G_A$ )에 포함되는 지배 프리미티브  $P_A$  면들의 집합을 의미한다. 실질적으로 가중함수  $w(d)$ 는  $P_A$  상의 경계면으로부터의 거리를 매개변수로 하여 블렌딩 영역의 재질성분을 표현하게 된다.

**Step 3:** 중립면(neutral face)을 기준으로 블렌딩 영역을 분할한다.

중립면은 Fig. 8-(b)에서와 같이 중립모서리(neutral edge)로부터 생성되는 ruled face이다. 중립면에 의해 블렌딩 영역은 두 개의 부분렌딩 영역  $Z_1$ 과  $Z_2$ 로 분할된다.

**Step 4:** 각각의 부분렌딩 영역에 속하는 부영역들을 순차적으로 근사화 한다.

부분렌딩 영역  $Z_1$  (or  $Z_2$ )에 속하는 각각의 부영역  $P_{B11} \sim P_{B61}$  (or  $P_{B12} \sim P_{B62}$ )들은  $P_{A11}$  (or  $P_{A21}$ )와 가중함수  $w(d)$ 에 의해 블렌딩된다. 그러므로 가중함수  $w(d)$ 를 근사화 함으로써  $P_{B11} \sim P_{B61}$  (or  $P_{B12} \sim P_{B62}$ )는 최종적으로 더 작은 부영역들로 분해된다.

Fig. 8-(c)는 가중함수  $w(d)$ 의 근사화 과정을 보여주고 있다. 가중함수 근사화에 사용될 두 부영역(예  $P_{A11}$ 와  $P_{B11}$ )에서의 지배재질의 부피퍼센트를 각각  $(v_d)_A$ 와  $(v_d)_B$ 라고 가정하면, 근사화 스텝 수  $n_s$ 는 아래 식 (7)과 같이 된다.

$$n_s = \text{int}(\Delta v_d / r) \text{ where } \Delta v_d = |(v_d)_A - (v_d)_B| \quad (7)$$

그리고 가중함수 근사화를 위한 지배방정식은 아래 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(d) = w(d) - w_i = 0$$

$$\text{where } w_i = \frac{2i+1}{2n_s} \quad (0 \leq i < n_s) \quad (8)$$

위 식에서  $w_i$ 는  $i$ 번째 근사화 스텝에 사용된 가중함수의 값을 의미한다.

위와 같은 불리언 복합재 근사화 과정에서 프리미티브 복합재와 마찬가지로 추가오차  $\epsilon_b = r/2$ 가 발생

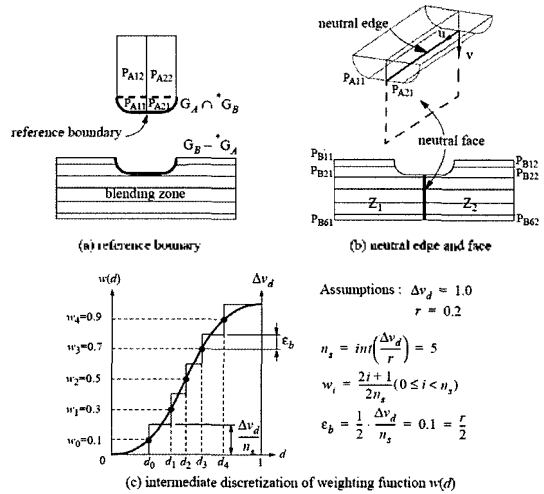


Fig. 8. Detailed discretization steps.

한다. 불리언 복합재의 이진트리(의 깊이가 증가한다면 발생오차는 계속적으로 증가할 것이다. 그러므로 불리언 복합재의 근사화 과정에서는 그 깊이에 따른 근사화 정도( $r$ ) 값을 지수적(exponential)으로 감소시켜 특정 값에 수렴하도록 만들 필요가 있다. 만약, 불리언 복합재의 이진트리의 깊이가 1이라고 가정하면, 최종적으로 근사화에 의해 발생하는 부피퍼센트 오차는  $\epsilon_{tot} = \epsilon_p + \epsilon_b = r$ 이 된다.

3.3 적용 예

Fig. 9는 Fig. 3-(c)에 소개된 하나의 중간홀과 8개의 주변홀을 가지는 압력관<sup>[12]</sup> 모델의 근사화 과정을 보여주고 있다. 첫 번째 프리미티브  $P_A$ 는 열보호층을 가진 FGM으로 hole면으로부터의 거리에 따라 세라믹에서 메탈로의 연속적인 재질변화가 존재 한다. 근사화 정도  $r=0.1(10\%)$ 를 적용하여 최종적으로 11

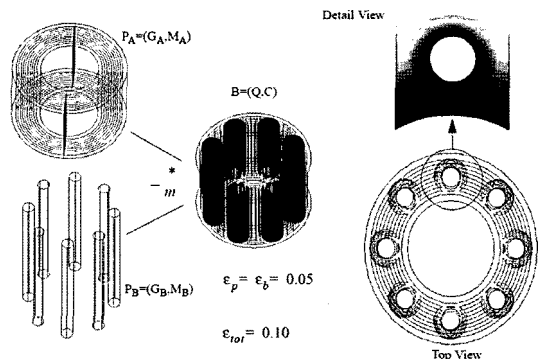


Fig. 9. Hierarchical discretization of the pressure vessel.

개의 부영역으로 분해되었다. 두 번째 프리미티브  $P_B$ 는 세라믹 재질로만 구성되어 있으므로 더 이상의 분해과정을 필요로 하지 않는다.

Fig. 10은 다른 적용 예로 MMC(Metal Matrix Composite) 크라운을 가지는 피스톤 헤드<sup>[13,14]</sup> 모델의 생성과정 및 근사화 과정을 보여주고 있다. 일반적으로 MMC 재질은 매우 가벼우며, 내부식성이 강하고, 가격도 저렴하다. 최종 복합재 모델은 2개의 하위 단계 복합재에 이방성 파티션 불리언 작업을 수행하여 생성하였다. 특히 첫 번째 프리미티브 복합재는 스틸 substrate 위에 열보호층으로써 지르코늄 성분의 FGM 코팅층을 가지고 있다.

Fig. 10-(b)는 두 가지의 근사화 정도  $r=0.25$ 와  $r=0.125$ 를 적용하여 분해된 피스톤 헤드 모델에서 재질성분 분포를 보여주고 있다. 첫 번째 프리미티브  $P_A$ 는 두 가지의  $r$  값에 의해 각각 5개, 9개의 부영역으로 분해되며, 두 번째 프리미티브  $P_B$ 는 MMC 단일 재질로 구성되어 있으므로 분해과정이 필요하지 않다.

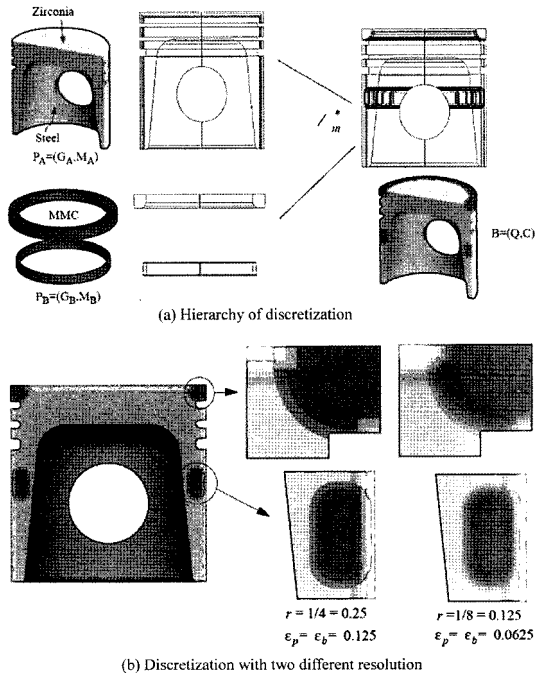


Fig. 10. Model construction and discretization of the piston head.

#### 4. 적층방향 선정 및 슬라이싱

부피피센트 근사화 과정을 거쳐 연속적인 재질성분 변화를 가지는 FGM 모델이 각각 상이한 단일 재질성

분을 가지는 단일 복합재들의 집합인 다중 복합재 모델로 변환되면, 기존의 공정계획(적층방향 선정, 적용 슬라이싱, 돌 경로 생성)들을 부분 수정하여 적용할 수 있다. 즉, FGM 모델에서의 재질성분 정보가 다중 복합재 모델에서는 Fig. 11-(d)에서와 같이 내부 형상 정보(m-feature)로 변환되기 때문에, 기존의 공정계획에서 외부 형상정보(g-feature)를 처리하듯이 내부 형상정보를 처리할 수 있다. 구체적으로 내부 형상정보는 Fig. 11-(d)에서와 같이 상이한 재질간의 경계면을 의미한다.

전술한 바와 같이 복합재를 위한 적층조형 머신들은 컴퓨터의 제어 아래 동시에 여러 가지 재질을 미세한 점의 형태로 쌓아서 원하는 재질성분 및 형상을 만들 수 있다. 그러므로 본 장에서는 분해된 다중 복합재 모델의 외부 형상정보와 내부 형상정보에 기반한 적층방향의 선정(orientation)과 적용 슬라이싱(adaptive slicing)에 대해서 설명한다.

#### 4.1 적층방향의 선정(Orientation)

분해된 다중 복합재 모델의 적층조형을 위해서는 적절한 적층방향의 선정이 필요하다. 적층조형은 여러 가지 재질을 이용하여 한 층씩 형상을 쌓아 올리는 2.5차원 프로세스이기 때문에 일반적으로 머신의 적층방향은 Z 방향이다. 그러므로 여러 가지 판단 기준을 고려하여 모델을 어떻게 Z 방향으로 위치시키느냐가 실제적인 적층방향 선정에서 고려해야 할 문제이다. 일단 적층방향이 선정되면, 지구 중력에 의해 자체적으로 적층이 불가능한 오버행(overhang)을 제거하기 위한 지지구조의 생성(support generation)이 필요하다.

적층방향의 선정과정에는 여러 가지 판단기준이 존재하는데 참고문헌[15]에 자세히 소개되어 있다. 복합재의 경우 적층시간 및 최종 제품에서의 재질성분 오차를 최소화 함이 요구된다. 각 층에서의 재질성분의 변화(물 변경 횟수)를 최소화하고, 지지구조의 부피를 최소화 함으로써 위의 목적은 달성될 수 있다.

단일재 적층의 경우 적층시간은 외부 형상의 복잡도에 좌우된다. 이러한 관점에서 부피피센트 근사화 과정은 복합재의 적층시간을 평가하여 적층방향을 선정하는데 매우 효과적이다. 왜냐하면, 근사화 과정에 의해 재질정보가 이미 내부 형상정보로 변환되었기 때문이다.

Fig. 11은 분해된 다중 복합재 모델의 적층방향을 선정하는 과정을 보여주고 있다. 여러 가지 판단기준 중에서 본 논문에서는 각 층에서의 재질성분의 변경

횡수(C)를 최소화 하는데 초점을 맞추고자 한다. 재질 성분 변경횟수의 최소화는 결국 총 적층시간( $T_{build}$ ) 및 파우더 재료의 낭비를 최소화 할 수 있고, 최종 제품에서의 재질성분 오차도 줄일 수 있다. 총 적층시간( $T_{build}$ )은 아래 식 (9)와 같이 머신 동작시간( $T_{manuf}$ )과 유희시간( $T_{idle}$ )으로 구성된다.

$$T_{build} = T_{manuf} + T_{idle} \quad (9)$$

위 식에서  $T_{manuf}$ 는 실제 파트와 지지구조의 적층에 소요되는 시간을 의미하며,  $T_{idle}$ 은 Z 축 이송, 냉각, 평탄화(leveling), cleaning, 밀링, 그리고 재질성분 변경( $T_{mc}$ ) 등의 비생산적인 작업에 소요된 시간을 의미한다.  $T_{mc}$ 는 Fig. 2에 보인 powder mixer와 powder 공급노즐 속에 잔존하는 찌꺼기를 붙여내고, 새로운 powder를 공급하여 혼합하는 데 걸리는 시간이다. 단일재의 적층에서는  $T_{mc}$ 가 거의 0에 가깝지만, 복합재의 적층에서는  $T_{idle}$ 의 대부분을 차지하여 총 적층시간을 좌우할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는  $T_{mc}$ 를 최소화하기 위해 재질성분의 변경횟수(C)를 최소화할 수 있는 알고리즘을 소개한다.

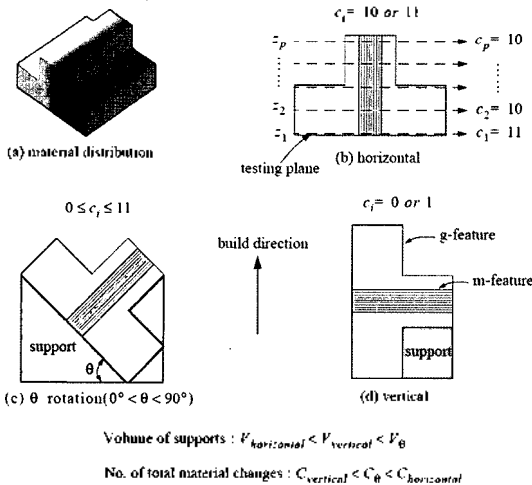


Fig. 11. Orientation of the discretized FGM.

임의의 적층방향에서 재질성분 변경횟수(C)를 계산하기 위한 알고리즘은 아래와 같다.

**Step 1:** 주어진 적층방향에서 분해된  $j$ 번째 단일 복합재의  $\min_{z_i}$ 와  $\max_{z_i}$  값을 구한다.

**Step 2:**  $z = z_i$ 에 테스트 평면을 생성하여 각각의 단일 복합재와 교차 횟수( $c_i$ )를 구한다.

내부적으로  $j$ 번째 단일 복합재가  $\min_{z_i} \leq z_i \leq$

$\max_{z_i}$  조건을 만족하면 테스트 평면과 교차점이 있는 것으로 판단한다. 만약 재질성분이 같은 단일 복합재들이 존재한다면 교차횟수는 한번만 계산한다.

**Step 3:**  $z_i$ 를  $\Delta z$ 만큼 증가시켜 가면서, Step 2를 반복하여 총 교차횟수를 계산한다.

만약  $i-1$ 번째 테스트 평면과  $i$ 번째 테스트 평면이 최소 하나의 동일한 단일 복합재와 교차한다면, 스텝 증가에 따른 재질성분 변경이 필요하지 않으므로 총 교차횟수에서 1을 빼준다. 최종 재질성분 변경횟수(C)는 아래 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$C = \sum_{i=1}^p c_i \text{ where } p = \text{int}\left(\frac{h}{\Delta z}\right) + 1 \quad (10)$$

위 식 (10)에서  $p$ 는 총 테스트 평면의 개수를 의미하며,  $h$ 는 적층방향으로 위치시킨 다중 복합재의 총 높이를 의미한다. 그리고  $c_i$ 는  $i$ 번째 테스트 평면과의 교차횟수를 나타낸다.

만약 SLS(selective laser sintering)과 같은 적층머신을 사용한다면, 지지구조에 대해서는 재질성분 변경을 할 필요가 없어진다.

Fig. 11-(a)는 근사화 정도  $r = 0.1(10\%)$ 을 적용하여 11개의 단일 복합재로 분해된 FGM 모델을 보여주고 있다. 분해된 모델이 수평방향으로 위치할 경우, 지지구조는 필요하지 않지만, 여러 번의 재질성분 변경이 필요하다. 반대로, 수직방향으로 위치할 경우, 하나의 지지구조가 필요하지만, 각각의 층에서는 재질성분의 변경이 필요하지 않다. 비록 각각의 위치에서 테스트 평면의 개수는  $p_{horizontal} < p_{\theta} < p_{vertical}$ 이지만, 재질성분 변경 횟수는  $C_{vertical} \ll C_{\theta} < C_{horizontal}$ 와 같이 된다. 그러므로 분해될 모델을 수직방향으로 위치시킴이 바람직하다. 하지만, 이상에서 소개한 알고리즘은 대략적으로 재질성분 변경횟수를 계산한 것으로 정확한 횟수를 계산하기 위해서는 다음 장에 소개될 적응 슬라이싱이 필요하다.

#### 4.2 적응 슬라이싱(Adaptive Slicing)

일단 분해된 다중 복합재 모델이 진술한 적층방향 선정방법에 의해 위치되면, 서로 다른 z 값에서 슬라이싱 평면과 교차시켜 슬라이스 데이터를 계산하게 된다. 이 때 지지구조도 같은 슬라이싱 평면과 교차시켜 필요한 데이터를 얻는다. 주어진 높이에서의 슬라이스 데이터는 일반적으로 여러 개의 폐루프(closed loop)로 이루어져 있고, 각 루프(loop)의 재질 성분은 균일하다(iso-material loop).

일반적으로 슬라이싱 방법은 두 인접한 슬라이스



간의  $z$  값 차로 정의되는 적층 두께(layer thickness)를 계산하는 방법에 따라 균일 슬라이싱(uniform slicing)과 적응 슬라이싱(adaptive slicing)으로 구분된다. 균일 슬라이싱에서는 적층 두께가 모델의 형상 복잡도에 상관없이 항상 일정하지만, 적응 슬라이싱에서는 교차되는 곡면의 곡률에 따라 적층 두께가 결정된다. 그러므로 적응 슬라이싱은 균일 슬라이싱과 비교하여, 적층조형에서 필연적으로 발생하는 계단효과(stairstep effect)에 의한 cusp height를 감소시켜, 표면조도(surface finish)를 향상시킬 수 있으며, 원래의 모델을 보다 정확하게 근사하여 적층할 수 있다는 장점이 있다.

근사화 과정에 의해 분해된 다중 복합체의 적층 과정에서 계단효과는 외곽 형상에서는 형상오차를 유발하며, 내부형상에서는 재질성분 오차를 야기시킨다.

본 논문에서는 Kumar<sup>[6]</sup> 등에 의해 제안된 적응 슬라이싱 알고리즘에 Fig. 12-(b)에서와 같이 재질성분 오차를 제한하기 위한 조건을 부과하여 사용하였다. Fig. 12-(a)는 적층 두께( $d$ )의 계산을 위해 자유곡면을 슬라이싱 평면에 수직인 방향으로 곡률을 가지는 원호로 근사화 하는 과정을 보여주고 있다. 여기서  $N$ 은 곡면 상의 점  $p$ 에서의 normal vector를 나타내며,  $\theta$ 는 슬라이싱 평면과 normal vector가 이루는 각도를 의미하며,  $\delta$ 와  $\rho$ 는 계단효과에 의한 cusp height와 곡률반경을 각각 나타낸다. 상수  $A, B, C$ 의 부호에 따라 8개의 다른 식을 유도할 수 있다. Fig. 12-(b)는 재질성분 오차를 제한하기 위해 새롭게 적용된 조건을 설명하기 위해, 하나의 g-feature와 두 개의 m-

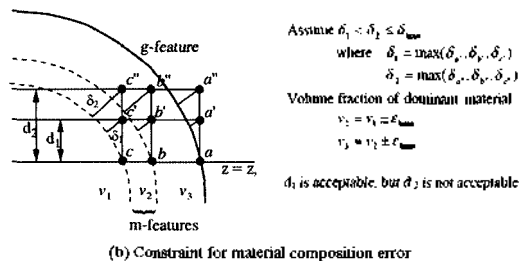
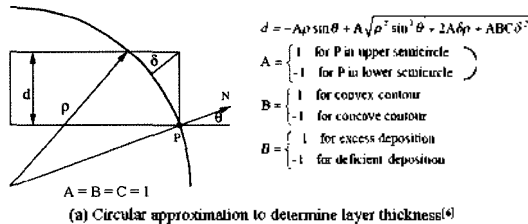


Fig. 12. Computation of layer thickness ( $d$ ).

feature가 존재하는 경우를 보여주고 있다. 만약 인접한 m-feature들의 재질성분 간에  $v_2 = v_1 \pm \epsilon_{limit}$ ,  $v_3 = v_2 \pm \epsilon_{limit}$ 인 조건이 성립한다고 가정하면, cusp height  $\delta_2 < \delta_{lim}$ 인 조건을 만족하더라도  $d_2$ 는  $z = z_1$ 에서의 적층 두께로 적합하지 않다. 왜냐하면, 선분  $cc''$ 가 인접한 m-feature와 교차하여 재질성분 오차가 허용오차( $\epsilon_{limit}$ )를 초과하기 때문이다. 만약  $\theta$ 가 90°에 가까워지면, 위의 재질성분 오차 제한 조건을 만족하는 적층 두께를 계산하는 것이 불가능해진다. 이 경우에는 적층 머신의 최소 적층 두께를 선택한다.

Fig. 13은 Fig. 10에 보인 피스톤 헤드 모델의 적층조형을 위한 공정계획을 순차적으로 보여주고 있다. 피스톤 헤드 모델은 근사화 정도  $r = 0.25(25\%)$ 를 적용하여 분해된 후 지지구조의 무피를 최소화시키는 적층 방향으로 위치된다. 다음으로 피스톤 헤드 모델과 이를 완전히 감싸는 최소 실린더 형상간에 이방성 불리언 파티션 작업을 수행하여 지지구조를 생성한다. 마지막으로 적응 슬라이싱을 행하여, 필요한 재질성분 정보와 슬라이스 데이터를 생성한다. Fig. 13에서와 같이 생성된 각각의 슬라이스에는 서로 상이한 단일 재질성분이 부과되어 있기 때문에 서로 다른 색깔을 나타낸다.

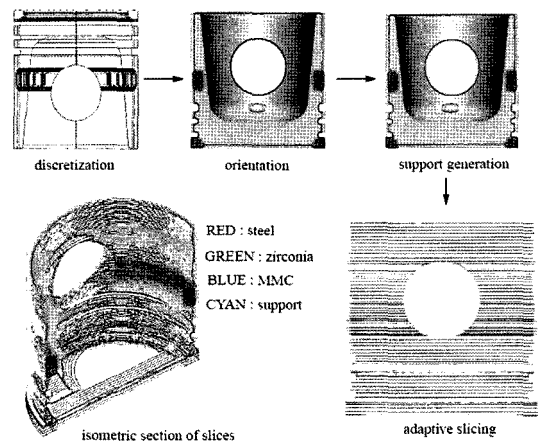


Fig. 13. Process planning for the piston head.

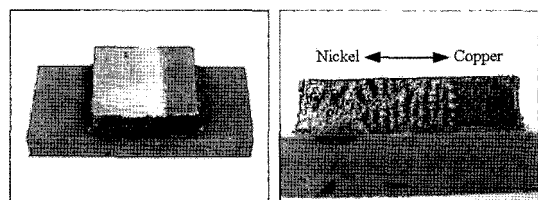


Fig. 14. An FGM fabricated by DMD (Copper-Nickel).

Fig. 14는 주성분 재질로 Copper와 Nickel을 사용하여 미시간 대학의 DMD 머신으로 제작한 FGM 샘플을 보여주고 있다<sup>16)</sup>. Copper와 Nickel을 주성분 재질로 사용한 이유는, 두 원소가 역상과 고상에서 완전히 고용되어 모든 조성의 범위에 걸쳐 동일한 결정구조를 나타내기 때문이다. 여기서의 적층방향은 DMD 머신의 적층 정도를 검증하기 위해, 재질성분 변경횟수를 최대화하는 방향으로 선택하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 현재 공학분야에서 활발한 연구가 진행되고 있는 기능성 경사복합재(FGM)의 적층조형을 위한 분해기반 공정계획을 제안하였다. 제안된 공정계획은 복합체의 CSG 기반 표현법에 기초하여, 연속적인 재질성분 변화를 가지는 FGM을 다중 복합체로 분해하는 부피퍼센트 근사화, 적층방향의 선정, 지지구조의 생성, 적응 슬라이싱 등으로 구성된다. 특히 근사화 과정에 의해 FGM 형상은 외부 형상정보(g-feature)로, 내부의 재질성분 정보는 내부형상 정보(m-feature)로 변환되어, 형상 복잡도에 따른 적층방향의 선정 및 적응 슬라이싱에 이용될 수 있었다.

본 논문에서는 실질적인 틀 경로의 생성과정<sup>17,18)</sup>은 다루지 않았지만, 적응 슬라이싱에 의해 생성된 각각의 iso-material 루프를 어떠한 틀 경로로 채울 것인가 하는 문제는 일반적으로 적층머신에 종속적이며, 최종 형상의 강도를 증가시키고 변형을 억제하며, 적층 시간 및 재질성분 오차를 최소화 시키는 방향으로 최적화 되어야 한다. 적층조형에서의 틀 경로는 노즐(nozzle) 혹은 레이저 빔(laser beam)의 경로를 의미한다.

DMD 머신의 경우 최소 적층점의 크기 및 적층 두께가 각각 0.01 inch이므로 실질적인 부피퍼센트 근사화에서 이보다 작은 g-feature 및 m-feature의 표현은 불가능하다. 또한 powder feeder에서의 flow rate 조절 단계수 및 powder mixer에서의 혼합 정도에 의해 부피퍼센트 근사화 정도가 결정된다.

향후 연구과제로 위와 같은 틀 경로의 최적화 뿐만 아니라, 적층 과정 및 재질의 변화 과정을 실시간으로 시뮬레이션하여 사전에 발생 가능한 모든 문제점을 발견하고 수정하는 컴퓨터 툴의 개발이 필요하다. 이러한 가상생산 시뮬레이션을 통하면, 최종 파트의 형상을 왜곡하거나, fixturing에 손상을 주거나, 적층 헤드를 파손하는 등의 문제를 사전에 방지할 수 있다. 한편, 제안된 공정계획을 이용하여 좀 더 복잡하면서

도, 공학적으로 응용성이 높은 FGM 파트의 적층조형을 수행할 필요가 있다.

## 참고문헌

1. Mazumder, J., Choi, J., Nagarathnam, K., Koch, J. and Hetzner, D., "The Direct Metal Deposition of H13 Tool Steel for 3-D Components", *JOM*, Vol. 49, No. 5, pp. 55-60, 1997.
2. Fessler, J., Nickel, A., Link, G., Prinz, F. and Fussell, P., "Functional Gradient Metallic Prototypes through Shape Deposition Manufacturing", *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, Austin, TX, pp. 521-528, 1997.
3. Cho, W., Sachs, E. M., Patrikalakis, N. M. and Troxel, D. E., "A Dithering Algorithm for Local Composition Control with Three-Dimensional Printing", *Computer Aided Design*, Vol. 35, No. 9, pp. 851-867, 2003.
4. Kumar, P., Santosa, J., Beck, E. and Das, S., "Direct-Write Deposition of Fine Powders Through Miniature Hopper-Nozzles for Multi-Material Solid Freeform Fabrication", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10, No. 4, 2003.
5. Marsan, A. and Dutta, D., "A Survey of Process Planning Techniques for Layered Manufacturing", *Proceedings of the 1997 ASME Design Technical Conferences*, Sacramento, CA, 1997.
6. Kumar, V., Kulkarni, P. and Dutta, D., "Adaptive Slicing of Heterogeneous Solid Models for Layered Manufacturing", *Proceedings of the 1998 ASME Design Technical Conferences*, 1998.
7. Wu, H., Sachs, E., Patrikalakis, N., Brancazio, D., Serdy, J., Jackson, T. R., Cho, W., Liu, H., Cima, M. and Resnick, R., "Distributed Design and Fabrication of Parts with Local Composition Control", *Proceedings of the 2000 NSF Design and Manufacturing Grantecs Conference*, Vancouver, BC, Canada, 2000.
8. Park, S. M., Crawford, R. H. and Beaman, J. J., "Functionally Gradient Material Representation by Volumetric Multi-Texturing for Solid Freeform Fabrication", *11th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2000.
9. Zhou, M. Y., "Path Planning of Functionally Graded Material Objects for Layered Manufacturing", *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 2, pp. 405-415, 2004.
10. 신기훈, 이진구, "임의 형상의 복합체 모델링을 위한 CSG 기반 표현", 한국 CAD/CAM 학회논문집, 논문계제예정, 2006.
11. Sachs, E. M., Wylonis, E., Allen, S., Cima, M. J. and Guo, H., "Production of Injection Molding Tooling with Conformal Cooling Channels Using the

Three Dimensional Printing Process”, *Polymer Engineering Science*, Vol. 40, No. 5, pp. 1232-1247, 2000.

12. Kwon, P. Y., “Macroscopic Design and Fabrication of Functionally Gradient Materials”, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 1994.

13. Suresh, S. and Mortensen, A., “Functionally Graded Metals and Metal-Ceramic Composites: Thermomechanical Behavior”, *International Materials Reviews*, 42, No. 3, pp. 85-116, 1997.

14. Donomoto, T., Miura, N., Funatani, K. and Miyake, N., *SAE Tech. Paper No. 83052*, Detroit, Michigan, 1983.

15. Allen, S. and Dutta, D., “Determination and Evaluation of Support Structures in Layered Manufacturing”, *Journal of Design and Manufacturing*, Vol. 5, pp. 153-162, 1995.

16. Shin, K. H., Natu, H., Dutta, D. and Mazumder, J. “A Method for the Design and Fabrication of Heterogeneous Objects”, *Materials & Design*, Vol. 24, No. 5, pp. 339-353, 2003.

17. 이성근, 박정환, “공구이동궤적 모델을 이용한 5축 페이스 밀링 가공 데이터 생성”, 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 35-43, 2004.

18. 주상윤, 이상현, “공구간섭으로 인한 미절삭 윤곽의 잔삭가공을 위한 효율적인 공구경로”, 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제7권, 제3호, pp. 184-189, 2002.



**신 기 훈**

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

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



**김 성 환**

1986년 2월 서울대학교 기계설계학과 학사  
 1988년 2월 서울대학교 기계설계학과 석사  
 1994년 2월 서울대학교 기계설계학과 박사  
 1994년 3월~1997년 2월 동서운대학 기계  
 과 교수  
 1997년 3월~현재 서울산업대학교 기계설  
 계자동화공학과 교수

관심분야: Geometric modeling, Surface Modeling, Virtual design & manufacturing