

신속성형기술 전용 벌집구조 형상 모델링 기술 개발

자 해 성*

Geometric Modeling of Honeycomb Structural Geometry for Solid Freeform Fabrication

Haeseong Jee*

ABSTRACT

Solid freeform fabrication technology, widely known as rapid prototyping and rapid tooling, can create physical part directly from digital model by accumulating layers of a given material. Providing a tremendous flexibility of a part geometry that they can fabricate, these technologies present an opportunity for the creation of new products that can not be made with existing technologies. For this to be possible, however, various design environments including different fabrication processes needs to be considered at the time of design, and finding an appropriate design solution for the new product by combining necessary design communications become increasingly complex as environmental condition become diverse. This paper proposes a geometric modeling paradigm for design and fabrication of a new product, honeycomb structural geometry.

Key words : CAD, Solid Freeform Fabrication, Rapid Prototyping, Honeycomb Structural Geometry

1. 서 론

Solid Freeform Fabrication(SFF) 기술은 설계된 제품의 3차원 CAD 정보로부터 곧 바로 물리적인 3차원 형상을 수 시간 이내에 신속하게 생성해내는 기술이다. SFF 기술을 구현하기 위한 기계 장치들은 여러가지 종류가 있으나 일반적으로 조형 소재를 적층(layer accumulation) 하여 파트를 구성하는 방식이 주종을 이룬다. 이러한 방식의 기계 장치들은 특정한 재료의 분말(SLS, 3D Printing) 이나 액상 혹은 유동성 고분자 재료(SLA, FDM), 혹은 종이(LOM)를 조형 소재로 이용한다는 점에서만 다를 뿐, 3차원 CAD 모델을 구성하는 각각의 박층(thin layer) 들을 단면에 수직인 방향으로 그리고 분할할 당시의 기하학적인 구성방식과 동일한 순서대로 밑에 있는 층위에 결합시켜 적층함으로써 물리적인 형상을 조형해낸다는 점에서는 그 원리가 모두 동일하다^[1]. 이 기술을 이용하면 복잡한 제품 형상의 모형은(rapid proto-

typing) 물론 최근에는 일부 제품 제조용 금형/주형의 생성까지도(rapid tooling) 가능한 단계에 이르렀다^[2].

일반적으로 제품 형상의 모델링은 실제 전체 과정을 통틀어 가장 시간이 오래 걸리는 단계이다. 또한 모델링이후에 얻어진 제품의 형상 정보는 제품 형상의 가공공구 간섭검사, 응력 해석, 유한요소 해석(FEM), 가공 전 공정 설계 및 NC 공구 경로계산에 이르는 제품 개발 전체 구간에 걸쳐서 공통의 설계자료 데이터 베이스로 운용이 되기 때문에 그 형상처리 단계에 있어서의 정확성이 매우 중요시 되어 왔고 이를 위해서 기하학적 모델링 기법의 신뢰성 및 완전성이 요구된다. SFF 기술도 실제 생산공학 분야에서 효율적으로 활용되기 위해서는 새로운 응용분야의 창출에 따른 특수한 형상의 기하학적 모델링 기술이 중요한 구비조건으로 요구된다^[3]. 특히 SFF 공정에서는 하나의 기하학적인 3차원 모델 정보가 다수 개의 2차원 박층 정보들의 수학적인 집합으로 분할, 재구성되어야 하기 때문에 정보 변환에 따른 제반 수학적 계산이 정확하게 수행되어야 함^[4]은 물론 조형파트 표면에 생성되는 박층 무늬의 영향등이 기하학적 모

*중신회원, 홍익대학교 기계공학과

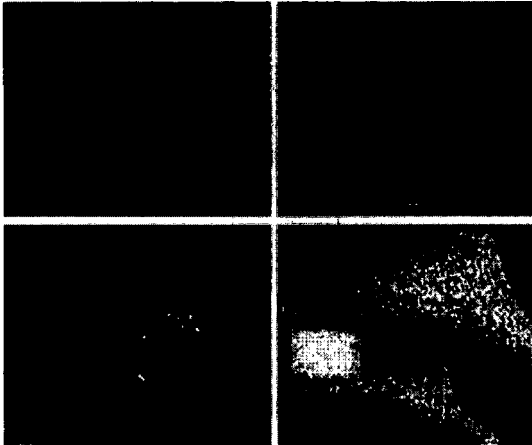


Fig. 1. Examples of HGC made by FDC machines.

모델링 과정에서 반영이 되어야 한다⁶⁾. 이를 위해서는 모델링 기법의 다원화, 보다 구체적으로는 응용분야에서 요구하는 여러가지 특수한 기하학적 형상들의 생성을 위한 형상 모델링기능이 요구되는데 본 논문에서 다루고자 하는 벌집 구조 형상(HSG: honeycomb structural geometry)이 그 한 예이다. HSG는 그 내부 단면 형상이 마치 벌집의 단면과 같은 구조로서 하나의 동일한 재질(homogeneous material)로 빈틈 없이 채워진 솔리드 구조라기보다는 수 없이 많은 미세한 동공(void space)과 동공을 둘러싼 물질(material)의 혼합으로 이루어진 이종 재질(non-homogeneous material)로 정의된다. Fig. 1은 SFF 장비의 일종인 FDC(Fused Deposition Ceramic) 장비에 의해서 조형된 간단한 HGC 형상들의 예를 보여준다.

한편 이때 HSG의 내부 단면을 구성하는 소규모의 단위 형상은 단위세포형상(unit cell)이라 하여 그 형상 특징을 결정짓는 중요한 인자이다. 따라서 HSG와 같은 특수한 기하학적 형상을 모델링하는 과정에서 첫 번째로 고려되어야 할 조건은 균등한 크기와 밀집도를 가진 수천 개의 기하학적 단위세포형상 모델을 3차원 공간상에 적절히 배치하고 이들을 적절히 운용하여 설계자가 의도하는 전체 HSG의 기하학적인 형상을 생성할 수 있는 가능하다.

실질적인 응용분야에서 HSG의 통상적인 단위세포형상의 크기는 최대 수 밀리미터에서 최소 1 밀리미터 이하의 범위에서 정의되어야 하는 까닭에 HSG 모델링 기능으로서 두번째로 고려되어야 할 조건은 조형가능성, 즉 조형성이다. 조형성은 수백 혹은 수천 개의 소재 층이 적층되어 전체 형상이 조형되어야 하는 SFF 공정의 특성상 조형파트 형상 표면에 남게되

는 계단형 자국(staircase mark)에 가장 큰 영향을 받는다. 일반적인 크기의 조형파트에서는 계단형 자국들이 표면 정도에만 영향을 끼치는 것으로 이해되어 왔으나 최근에는 그 응용분야에 따라서 그 자체가 조형 형상의 조형성에까지 영향을 준다⁷⁾. 따라서 이 경우 계단형 자국은 조형 한계라는 개념으로 받아들여져야 하며 이러한 한계를 형상모델링시 반영해 주어야 한다.

본 논문은 적층방식의 SFF 기술의 응용분야들중에서 특수한 기하학적 형상을 필요로 하는 HSG를 대상으로 그 형상 모델링 기법에 관하여 기술하고자 한다. 이를 위해서 하나의 HSG를 구성하는 하부 형상 단위로서 단위세포형상의 기하학적인 형상을 정의하되 이 과정에서 형상의 치수설계값이 조형장비의 조형공정특성으로부터 도출된 한계수치 값에 의하여 적절히 제한되도록 하였다. 다음에는 정의된 단위세포형상들을 주어진 3차원 공간상에서 적절한 기하학적인 경계 조건과 함께 균등하게 분포시켜 하나의 HSG를 생성하는 작업을 수행하게 된다. 이를 위해서는 우선 HSG의 골격을 이루는 격자형 형상 구조에 에너지 장(場) 개념을 부여하고 여기에 최소 에너지화 이론(energy minimization)에 의한 수치해석법을 적용하여 각각의 격자가 최대한 균등한 크기로 정의되도록 하고 이 격자 하나하나에 정의된 단위세포형상을 사상(mapping) 시켜 전체 HSG 형상이 생성되게된다. 사상작업시 격자의 기하학적인 모양과 단위세포형상의 적응성(geometric conformity)을 부여하기 위해서는 자유형상변형(FFD: Free-Form Deformation) 이론을 적용하였다. 또한 이로 인한 형상치수의 설계범위로부터의 이탈을 방지하기 위하여 설계조건확인(design rule checking) 알고리즘을 동시에 적용하였다.

2. HSG와 설계구성요건

2.1 HSG

본 논문에서 다루고자 하는 HSG의 고유한 특징중의 하나는 바로 각 단위세포형상의 크기 및 이웃한 세포와의 경계를 이루는 솔리드 벽면두께의 형상 수치 값이 설계자가 의도하는 특정한 치수로 정의되어야 한다는 점이다. 일례로서 일상 생활에서 널리 쓰이는 스펀지(sponge)의 경우, 그 단면 형상은 제작과정에서의 물리적인 발포 현상에 의해 생성된 임의의 구조 형상이므로 각 동공의 크기와 위치는 물론 동공사이의 벽면의 두께도 일정하지 않아 본 논문의 주제로 다루고 있는 HSG와는 개념상 별개의 것으로

간주된다. 이밖에도 전산 그래픽스 분야에서는 3차원 CAD 모델의 표면에 미세화상 무늬(texture)를 입혀서 시각적 사실감(visual realism)을 증가시키는데 이용되고 있는 바, 수천 개의 기하학적 정보를 다룬다는 점에서는 HSG 모델링과 매우 흡사하지만¹⁰⁾ 그 본질상 3차원 기하학적 형상의 생성이라기 보다는 단순히 시각적 효과를 표방한 기술로서 가공이나 성형의 대상이 될 수 없기 때문에 본 논문에서 다루고자 하는 HSG 모델링 기술과는 거리가 멀다.

지금까지 HSG의 모델링에 관한 연구가 본격적으로 행하여지지 않았던 이유는 응용분야가 많지 않았기 때문이기도 하지만 복잡한 형상의 HSG의 경우 기존의 가공 기술을 이용하여 제조하는 것이 매우 어렵거나 불가능했기 때문이다. 즉 높은 생산성을 기대하기 어려워 기존의 기술로 가공이 가능한 간단하고 단조로운 패턴만을 가진 형상만을 제작할 수 밖에 없었고 복잡한 HSG 형상모델링 작업의 필요성이 절실히 요구되지 않았다. 그러나 SFF 기술은 조형시 기하학적인 형상의 복잡성에 좌우되지 않아 HSG와 같은 형상을 조형하는 데에 매우 적합하다. 따라서 그에 따른 생산성 증가로 보다 복잡한 HSG의 형상조형을 위한 모델링 기술도 점차 필요로 하게 되었다. 최근에 HSG를 이용한 대표적인 응용분야로서는 캐비티(cavity) 외곽을 둘러싸면서 주물 냉각시 발생하는 열 응력을 흡수하도록 하는 주형 구조, 인공관절의 표면형상 설계에 적용된 표면 미세 돌기구조(surface macro-texture)를 비롯하여 유체가 통과하는 도관 벽체를 이루면서 유체에 포함된 불필요한 성분을 분리하는 filter 구조 등을 들 수 있다.

2.2 HSG설계요건

HSG의 특정한 형상특성을 구현하기 위해서는 설계된 HSG가 그 크기와 방향에 있어서 규칙적이어야 하며(조밀성: regularity) 또한 설계된 HSG의 형상 보정이나 수정이 설계자의 의도대로 용이해야 하고(제어성: controllability), 그리고 마지막으로 설계된 HSG가 주어진 신속성형장비에 의하여 무리없이 조형될 수 있어야 한다(조형성: manufacturability). 즉 HSG 모델링 기술에 있어서 가장 중요한 부분은 임의의 단위세포 형상을 기준으로 수 천개의 기하학적 단위세포 형상을 적절히 배치함으로써 전체 HSG를 생성하는 모델링 기능과 이처럼 생성된 모델링형상을 지정된 조형장치를 이용하여 오차없이 조형하기 위한 조형한계의 반영기능이 설계단계에서 동시에 만족되어야 한다는 것이다. 한편 HSG 모델링에 필요한 설계

구속조건(design constraints)은 다음과 같이 3가지로 대별된다.

첫째, 3차원 공간상에서 주어진 기하학적인 구속조건(geometrical constraints)으로서 각 단위세포들의 위치와 방향벡터등에 가해지는 구속조건.

둘째, 설계자의 주관에 의해 결정되는 형상 치수에 의한 구속 조건(dimensional constraints)으로서 단위세포들의 구성조건에 의한 HSG 형상의 정의(embodiment design) 시 반영되는 구속조건.

셋째, 조형장비에 의한 구속 조건(manufacturing constraints)으로서 각각의 SFF 조형장치들이 각각 가지고 있는 조형한계치수에 의해 결정되는 구속 조건.

2.3 HSG 모델링기법

본 연구에서의 HSG 모델링 과정을 설계 단계별로 서술하면 첫째, 조형 한계를 반영할 수 있는 기본형상(basic primitive)을 모델링하여 이들을 기반으로 단위세포 형상을 정의하고 둘째, 수천 개 단위세포 형상들에 요구되는 설계구속조건을 동시에 만족할 수 있는 최적 조건을 수치해석적으로 찾아내어 하나의 HSG를 최종적으로 모델링하는 것으로 요약된다. 첫 번째 단계는 간단한 기하학적 기본형상들을 정의하고 이들 기본형상들을 기준으로 좀더 복잡한 단위세포 형상을 생성하는 과정이다. 기본형상들을 정의하는 데 필요한 형상 표현변수 및 치수 변수(parameter)들에 대해서는 조형한계성(fabrication limitation)을 반영하여 이를 한계형상(constrained parametric feature)으로 정의하고 각각의 한계형상들은 통합설계(constraint integrated editing) 기법¹⁰⁾에 의해 이용하여 서로 결합시켜 다시 하나의 단위세포 형상을 구성한다. 일단 정의된 단위세포 형상은 설계용 기하학적 형상 패턴 라이브러리(pattern library)에 저장되어 후에 그 설계 수치 값을 적절히 수정, 다른 종류의 HSG를 모델링하는데 이용될 수 있다. 두 번째 단계에서는 정의된 단위세포 형상이 하나의 군을 이루어 설계자가 의도하는 HSG로 구성되도록 하는 과정이다. 이 단계에서는 수천 개의 단위세포 형상들이 3차원 공간상에 정의된 여러 가지 기하학적 설계 구속 조건을 동시에 만족할 수 있는 최적의 해를 구해야 한다. 이를 위해서는 단위세포형상의 정의에 사용된 block과 CSG 기본형상들은 Sederberg의 삼원 번스타인 다항식(Trivariate Bernstein Polynomial Transforms)의 원리를 이용하여 자유형상변형¹⁰⁾(FFD: Free-Form Deformation)이 가능하도록 하되 이들의 기하학적 형상으로부터 위치와 방향 그리고 거리와 같은 물리량을 기준으로

로 에너지 함수를 정의하고^[11] 이 함수를 수치해석적(numerical method) 방법으로 최소화함으로서 각 세포형상들의 최적의 모델링형상 변수 값들을 계산한다. 최적설계를 위한 수치해석 방식에는 여러 가지가 있으나 여기서는 설계조건보상법(penalty method)을 이용하였다. 이 과정에서는 또한 개개의 세포형상들에 대하여 산출된 형상변수 값들에 대하여 설계구속조건 만족도 검사를 행하게 되고 이를 위해 설계조건확인(design rule checking) 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 이러한 과정을 거쳐 생성된 최적 HSG 형상 모델은 결국 실제 SFF 장비의 조형 한계를 설계 단계에서 미리 고려한 설계형상이므로 설계상의 오류에 기인한 가공상의 문제를 배제하게 된다.

3. 조형 한계 치수와 조형 오차

일반적인 SFF 기술에 의한 물리적인 모델의 조형은 그 성격상 높은 조형 치수 정도를 기대하기 어렵다. 그럼에도 불구하고 HSG형상의 실용적인 설계 범위는 통상 수 밀리미터로부터 작게는 1 밀리미터 이하에 이른다. 따라서 SFF 기술에 의한 HSG 조형의 성공 여부는 주어진 조형 장치가 조형해 낼 수 있는 수치적인 한계 범위가 어느 정도인지를 먼저 파악하고 이를 설계 시 반영해 줄 수 있는 모델링 성능에 의하여 좌우된다. 일반적으로 조형 한계 치수의 결정요인은 조형 기계 장치의 조형 정밀도에 의하여 좌우된다. 여기서 조형 정밀도란 조형 해상도(resolution)와 조형 오차(discrepancy or deviation)가 반영되어 결정되는 수치량이다. 즉 주어진 설계 수치에 대하여 조형을 시행할 경우 결과로 얻어질 조형물의 기하학적인 크기와 위치가 설계형상의 그것들과의 일치도를 판단할 수 있는 수치량이다.

조형장비의 조형정밀도를 결정하는 모든 요인들을 완벽하게 해석적인 수식으로 나타내는 것은 불가능하므로 본 논문에서는 모든 적층형 SFF 조형장비에 대해서 일반적으로 적용될 수 있는 조형공정에 한하여 수치적인 한계 범위를 도출하고자 하였다. 먼저 조형 해상도 크기의 정의에 관계되는 벡터 \bar{M} , 조형 오차를 정의하는 벡터 \bar{N} , 그리고 정의된 2개의 벡터 \bar{M} , \bar{N} 에 의거하여 실제 조형이 가능한 직교좌표방향의 조형한계치수를 정의하는 벡터 \bar{E} 를 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{M} = \{^i M_i | M_i \in R^3, i=1,2,\dots, l\} \quad (1)$$

l : number of variables

$$\bar{N} = \{^j N_j | N_j \in R^3, j=1,2,\dots, m\} \quad (2)$$

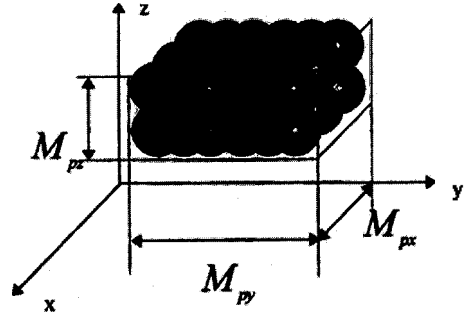


Fig. 2. Minimum manufacturing capability in a generalized fabrication coordinate.

m : number of variables

$$\bar{E} = \{^k E_k | E_k \in R^3, k=1,2,\dots, n\} \quad (3)$$

n : number of variables

예를 들면 Fig. 2는 일반적인 조형대위에서의 임의의 양(+)의 특징형상(positive feature)을 기준으로 결정될 수 있는 조형 해상도 벡터 \bar{M} 의 성분들인 최소 조형변수 M_{px} , M_{py} , M_{pz} 를 나타낸 것이다. 또한 \bar{N} 은 각 직교 좌표계를 기준으로 조형정보와 실제 조형후의 파트의길이를 비교하였을 때 발생하는 오차에 영향을 주는 항목들을 정의하는 벡터이다. 예를 들면 장비의 기계적 오차, 후가공(post process)이나 파트의 수축(shrinkage) 등에 의하여 발생하는 크기 오차 등을 들 수 있다. 그러므로 조형한계치수에 관한 벡터 \bar{E} 는 \bar{M} , \bar{N} 에 관한 함수로 표현될 수 있다고 가정하고 다음과 같이 다시 정의될 수도 있다.

$$\bar{E} = \{^K E_k | E_k = h_k(\bar{M}, \bar{N}), E_k \in R^3, K=1,2,\dots, n\} \quad (4)$$

n : number of variables

이와 같은 벡터들 \bar{M} , \bar{N} , \bar{E} 의 정의에 의거하여 조형정밀도를 해석하는 한 예를 구체적으로 제시하여 보자. 먼저 일반적인 적층형 SFF 조형장치에서 조형 해상도는 조형대 위의 x, y, z 3개의 축상에서 조형물을 생성할 조형장치의 3차원적인 거동과 관계가 있으며 실질적으로는 조형대 위의 x, y 평면상에서 조형물을 생성할 조형장치의 2차원 거동과 그리고 남은 방향인 z 축방향의 거동, 즉 조형대에 적층될 조형재료층의 두께로 생각할 수 있는데 그 이유는 조형대 평면위의 수직방향인 z 축방향은 곧 조형재료층의 두께에 비례하여 결정되기 때문이다. 이때 일반적인 직교좌표계에서 조형한계치수는 x, y, z 각 좌표계에 기초한 조형장치의 동작 범위에 의거하여 조형장치가 만들어 낼 수 있는 조형물의 최소크기로 설명될 수

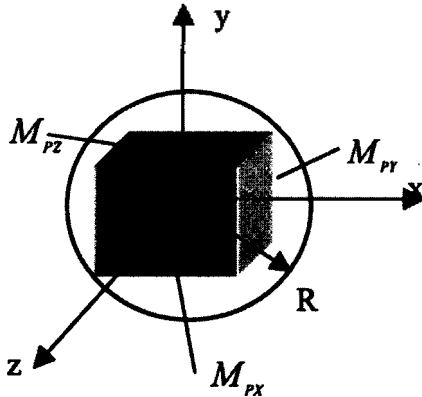


Fig. 3. A three dimensional ball space defined by three minimum manufacturing capability.

있다. 이를 다시 해석하여 보면 이들 3개의 최소조형 변수에 의해 정의된 최소 동작 범위를 조합하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 일정한 크기의 지름을 가진 3차원 구 공간이 얻어지게 된다. 여기서 구의 지름 E_p 가 바로 벡터 \bar{E} 의 한 구성 성분의 예이다. 이때 E_p 는 다음과 같은 간단한 수식에 의해서 M_{px} , M_{py} , M_{pz} 로 표현되고 주어진 조형 장치의 최소 조형 한계공간이 된다.

$$E_p = \sqrt{M_{px}^2 + M_{py}^2 + M_{pz}^2} \quad (5)$$

또한 조형 편차 혹은 조형 오차를 비롯한 여러가지 조형 장비 운용상의 변수들도 이러한 조형한계 수치에 적지 않은 영향을 줄 수 있으므로 조형 오차 벡터 \bar{N} 의 영향을 고려하기 위하여 다음과 같이 조형 수치를 정의한다.

$$E_p = E_p + f(\bar{N}) = E_p(1 + \alpha) \quad (6)$$

여기서 α 는 실험적인 분석을 통하여 그 영향도를 0에서 1사이의 계수로 정의 한다. 동일한 방법으로 일반적인 조형대위에서의 임의의 음(-)의 특징형상(negative feature)을 기준으로 조형오차가 조형해상도에 미치는 영향도를 0에서 1사이의 계수인 β 로 정의 하면 다음과 같이 조형한계수치가 정의 될 수 있다.

$$E_n = \sqrt{M_{nx}^2 + M_{ny}^2 + M_{nz}^2} \quad (7)$$

$$E_n = E_n + g(\bar{N}) = E_n(1 + \beta) \quad (8)$$

4. HSG 모델링시스템

하나의 HSG는 수천개의 단위 세포 형상들이 모여서 구성되고 그 각각의 단위세포 형상도 그보다도 작



Fig. 4. An example of hierarchical structure of HSG construction.

은 형상 구성 단위인 수 개의 기본형상 들로 다시 나뉘어 구성되는데 이와 같은 계층적(hierarchical) 형상구성관계가 Fig. 4에 나타내었다. 다음은 이들 각각의 모델링 과정에 관한 기술이다.

4.1 기본 형상 정의(basic primitive definition)

단위세포 형상의 형상 모델링은 우선 각 단위세포를 구성하는 기본 형상의 정의에서부터 시작되며 본 논문에서는 편의상 이들 기본형상을 CSG primitive로 정의하였다. 이는 미세한 기하학적 형상인 단위세포 형상을 free form surface 와 같은 복잡한 형상표현으로 정의할 필요가 없기 때문이기도 하지만 무엇보다도 첫째, 단위세포형상의 정의 작업이 간편하고, 둘째, 2차원 단면화 작업과 같은 조형 정보를 산출작업이 용이하게 되며, 셋째, 일단 조형한계 수치에 의하여 CSG primitive 들의 크기를 적절하게 제한하여 정의하면 나중에 이들의 조합으로 구성될 단위돌기 세포와 HSG의 형상 설계 치수 및 조형한계수치 조건을 자동적으로 충족시킬 수 있기 때문이다. Fig. 5에 나타난 각 기본형상들의 치수 변수들은 전 단계에서 정의된 조형한계치수에 의거하여 다음과 같이 제한할 수 있다.

$$L, W, H, D, T, 2R \leq E_p \quad (9)$$

4.2 단위세포 형상의 정의

단위세포형상의 개념설계(cmbodiment design)는 HSG의 외형구조를 특징짓는 기하학적인 패턴(pattern)을 결정하는 것을 의미한다. 이들은 전체 벌집구조의 모

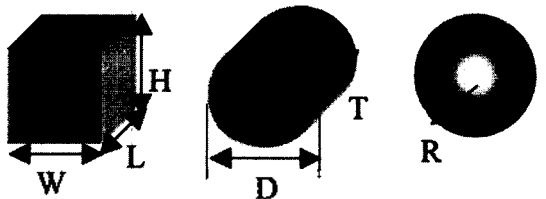


Fig. 5. Dimensional design variables for basic primitive definition



Fig. 6. A process of unit cell design.

양을 결정함은 물론 HSG 형상의 이방성(anisotropic property)과 같은 물리적인 형상특성을 결정하는데 있어서도 매우 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 이 과정에서 constraint-integrated editing 기법^[9]을 도입하여 적용함으로써 각 CSG 기본형상들이 조합되는 기하학적 조건을 통제하도록 하였다. 예를 들면 두 개의 block 형상들이 지나치게 가까워져 그들 사이에 조형이 불가능할 정도의 매우 좁은 기하학적 틈새를 형성하는 것을 방지하거나 혹은 기본형상의 크기를 확대하거나 줄이는 경우에 조형한계수치가 반영된 editing 기능에 의해 설계수치 범위밖에서 설계치수가 정의되는 것을 방지할 수 있다. Fig. 6은 이와 같은 기법에 의해 단위세포형상이 정의되고 있는 과정을 보여준다.

4.3 HSG의 형상 모델링

정의된 단위세포형상들은 기하학적으로 조합되어 전체 HSG의 모델링이 최종적으로 생성된다. 통상 수천 개의 단위세포형상들을 기하학적으로 조합하는 모델링 방식은 확률적인 방법(statistical method)과 해석적인 방법(analytical method)으로 구분된다. Fig. 7은 확률적인 방식에 의하여 본 논문에서 생성한 HSG 형

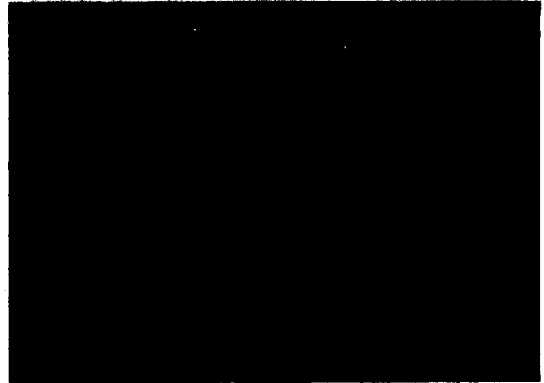


Fig. 7. An example of HSG created by a statistical method.

상을 보여준다. 확률적은 방식은 수행방식은 용이하나 설계변수들의 조절이 어려워 전산 그래픽스 분야에서는 텍스처(texture) 형상정의에 많이 이용되고 있으나 특수한 조밀도를 요구하는 HSG 모델링의 경우에는 설계변수들을 특정한 값으로 설정, 유지하기 곤란하므로 해석적인 방법이 보다 많이 사용된다. 본 논문에서 구축한 해석적인 형상모델링 단계는 다음과 같다.

첫째, HSG의 전체형상의 근간이 되는 3차원 격자 구조(gridframe)를 구성한다.

둘째, 이때 각 격자 cell 공간에 한 개의 단위세포 형상을 기하학적으로 사상(mapping) 한다.

셋째, 격자구조의 외부에서 격자 cell에 가해지는 기하학적 환경조건에 맞추어 격자 cell 공간 안의 사상된 단위세포형상을 조금씩 변형시키되 이때 변형량이 설계치수를 벗어나지 않도록 연속적으로 검사한다(design rule checking).

격자구조는 재료역학에서의 금속의 결정구조를 이용하여 simple cubic, body-centered cubic, face-centered cubic, 그리고 hexagonal close-packed의 4가지 기본구조에 의거하여 frame을 정의할 수 있다^[12]. 이때 경계조건에 상응하여 격자내부의 균등한 밀집도를 보장하기 위해서는 격자구조의 각 node 점들간의 연결선에 energy 개념을 적용한후에 격자구조 전체의 최소에너지상태를 추구하였다. 이처럼 이상화된 격자구조는 마치 완전 탄성체와 같은 물성을 지니게 되며 일단 외부 기하학적 경계조건에 의하여 격자구조의 변형원이 발생하여 국부적으로 변형이 일어나더라도 변형이 격자구조의 전체로 확산, 균등하게 분산 수용되므로 외부 경계조건에 의한 변형이 frame 구조에 미치는 영향은 최소화된다. 이를 해석적으로 구현하기 위해서는 격자구조내에 각 격자 node 간의 간격을 기준으로 정의된 변형에너지를 계산하고 이를 수치해석적

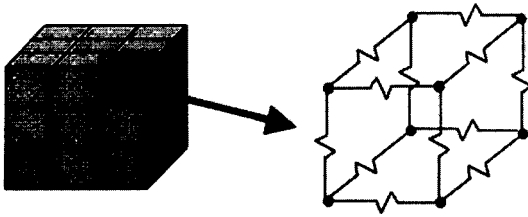


Fig. 8. A lattice frame model for HSG design.

으로 최소화한다. 이때 구해진 해를 기준으로 각 스프링의 변형량만큼 기하학적 위치를 이동시키면 의도하는 물리적인 형상을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 해석상의 편의를 위하여 simple cubic 결정구조를 2.5차원으로 단순화하여 정의하여 HSG 를 생성시켰다.

4.3.1 최소 에너지 이론

본 논문에서는 전술한 바와 같이 격자구조의 nodc 점들간의 간격을 선형스프링으로 연결한 것으로 가정한 후 전체 격자구조, 즉 격자스프링의 탄성변형에너지를 계산하였다. Fig. 8과 같이 격자스프링의 각각의 스프링에 대하여 다음과 같은 힘과 에너지의 관계식이 성립된다.

$$F_i = ks_i = k(x - x_0) \tag{10}$$

$$U_i = \frac{1}{2}ks_i^2 = \frac{1}{2}k(x_i - x_0)^2 \tag{11}$$

또한 이들 스프링으로 이루어진 격자스프링 전체에 대해서는 다음과 같은 에너지 함수가 성립된다.

$$E = \sum U_i = \sum \frac{1}{2}ks_i^2 = \sum \frac{1}{2}k(x_i - x_0)^2 \tag{12}$$

이와 같이 관심이 있는 하나의 시스템 계를 대상으로 에너지 함수를 합산하여 하나의 단일함수로 계산하고 이를 최소화하면 각각의 에너지 항이 최소화 되는 새로운 상태를 찾아낼 수 있다. 이 작업은 통상 수치해석적으로 이루어져야 한다는 데에 어려움이 있고 국부적인 최소점에 빠져서 해를 구하기 어려운 경우도 있으므로 설계자가 이를 적절히 통제함으로써 해를 찾아야 한다.

4.3.2 자유 형상 변형(FFD) 이론

본 논문에서의 단위세포형상의 정의에 사용된 단위 세포형상들은 간단히 Sederberg⁽¹⁰⁾의 삼원 번스타인 다항식(Trivariate Bernstein Polynomial Trans-forms)의 원리를 이용하여 외부의 기하학적인 구속조건에 따라 자유스러운 형상변형이 가능하다. 그 원리는 우선 세포형상들을 둘러싸고 있는 입방체 모양의 box hull (입방격자골격: cubic lattice frame)을 먼저 가정하고 이 입방체의 모서리 나 꼭지점의 상대적인 위치를 변

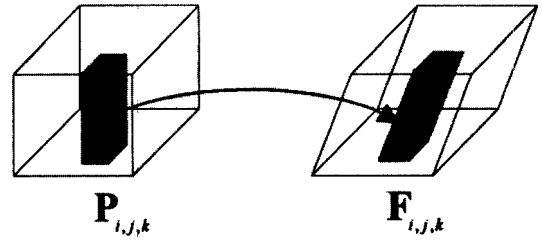


Fig. 9. An illustration of FFD in a cubic frame box.

화시키면 그 안의 세포형상도 따라서 변형하게 되는 것이다.

만약 이 입방격자골격 공간안의 임의의 점 X를 각각의 기저벡터에 관한 좌표계에서 정의 한다면 이 점은 다음의 식 (13)과 같이 정의된다.

$$X = X_0 + sS + tT + uU \tag{13}$$

이 점 X를 일반적인 표현인 P_{i,j,k}로 가정할때 이 점은 Fig. 9에서 보듯 입방격자골격이 변형하게 됨에 따라 변형된 격자내의 새로운 점 F_{i,j,k}로 이동하며 이는 다음과 같이 식 (14), (15)로 나타내어진다.

$$F_{i,j,k} = f_{FFD}(P_{i,j,k}) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^p \binom{n}{i} \binom{m}{j} \binom{p}{k} t^i (1-t)^{n-i} \times s^j (1-s)^{m-j} u^k (1-u)^{p-k} P_{i,j,k} \tag{14}$$

$$= \sum_i Q_{n,i}(t) \left(\sum_{j=0}^m Q_{m,j}(s) (Q_{p,k}(u) P_{i,j,k}) \right)$$

$$0 \leq i \leq n$$

$$0 \leq j \leq m$$

$$0 \leq k \leq p$$

i, j, k, n, m, p: 정수

$$Q_{n,i}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \tag{15}$$

where $\sum_{i=0}^n Q_{n,i}(t) = 1$

5. 적용사례

본 논문에서 생성시킨 형상모델은 각각 3차원 정방형 격자공간(grid cell)이 규칙적으로 배열된 격자 frame 모델을 대상으로 최소에너지 이론에 의하여 변형시키고 이를 기준으로 HSG 형상을 생성시켰다. 우선 Fig. 10, 11, 12는 3차원 정방면체(cube) 들이

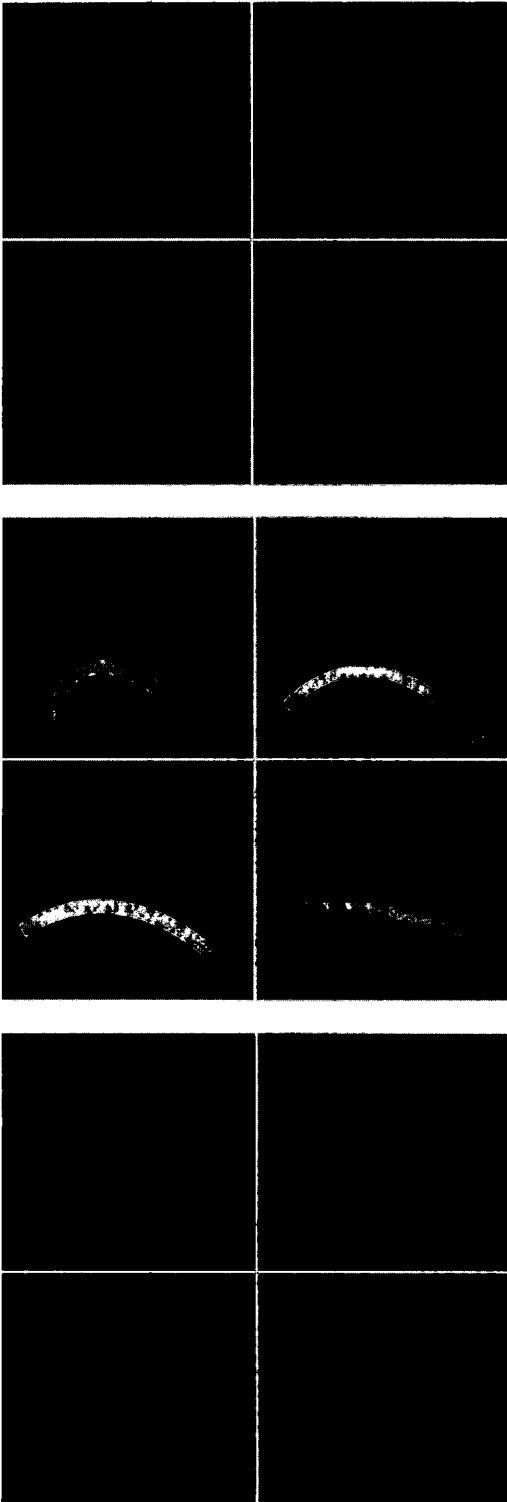


Fig. 10. Unconstrained regularization of 1-D(upper), 2-D(middle), and 3-D(lower) lattice frame model.

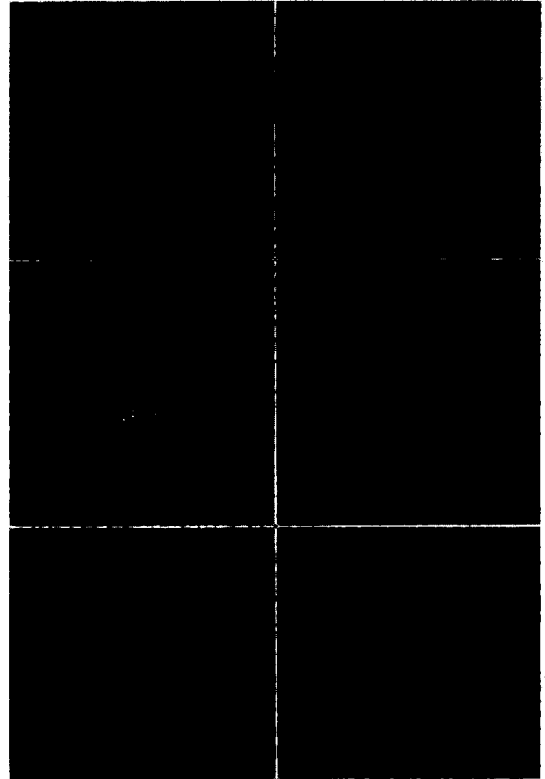


Fig. 11. Unconstrained regularization of 1-D(upper), 2-D(middle), and 3-D(lower) HSG model.

각각 1차원, 2차원, 그리고 3차원으로 배열된 격자 frame 모델을 생성시킨후 의도적으로 변형시켜 초기조건을 형성한 것이다. 이후 3차원 공간에서 어떤 구속조건도 받지 않은 채 최소에너지화(unconstrained energy minimization)가 진행됨에 따라 격자 frame 모델이 균일화(regularized)된 grid cell을 가진 frame 모델로 변해가고 있는 과정을 보여준다(좌상-우상-좌하-우하). Fig. 13는 이때 최초의 변형된 상태에서의 (좌측 상-중-하) 1, 2, & 3 차원 격자 frame과 최소에너지화에 의해 정형화된 격자 frame(우측 상-중-하) 모델에 각각 단위세포형상을 mapping하여 생성된 HSG 형태를 비교한 것이다. Fig. 14는 최초 의도적으로 변형된 격자 frame 모델의 안쪽 곡면을 기하학적 구속조건으로 구속한 채(그림 상단) 최소에너지화(constrained energy minimization)를 행하였을 때의 결과와(그림 중간) 그 당시의 HSG 형상을(그림 하단) 보여준다. 여기서 관찰되듯이 최소에너지화를 행하면 이미 구속조건이 존재하는 경우에도 그 내부의 단위세포형상이 보다 균일화된(regularized) HSG 형상구성을(왼쪽→오른쪽) 얻을 수 있음을 알 수 있다.

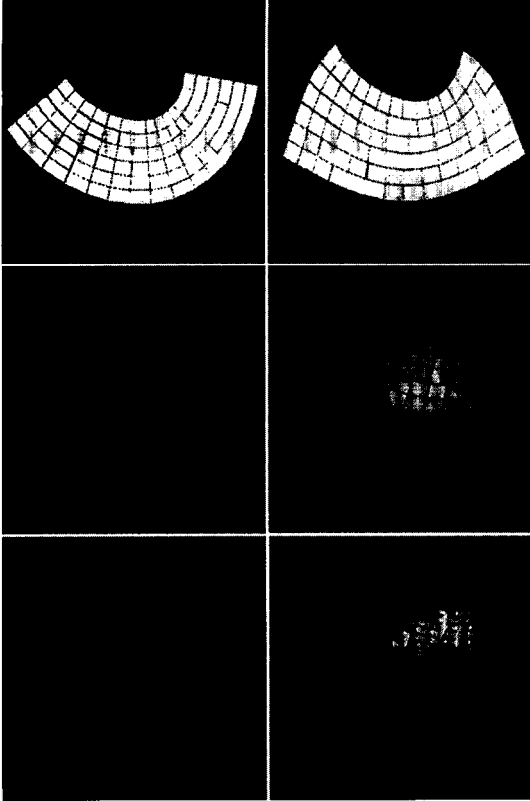


Fig. 12. Constrained regularization of 3-D lattice frame model (upper & middle) and HSG model (lower).

또한 최소에너지화에 따른 변형이 진행되어도 각각의 단위세포형상의 설계수치들은 3절에서 정의된 조형한계치수에 의하여 적절하게 구속, 제한되도록 설계모듈이 구축되어 있으므로 최종설계치가 항상 조형한계조건 범위내에서 정의되며 따라서 모델링 형상의 실제조형시 그 물리적인 형상이 설계된 대로 충실하게 재현되게 된다.

6. 결 론

본 논문은 최근에 신기술로 개발된 이후, 그 가공기술의 실용성 및 효율성의 우수함으로 인하여 그 응용분야가 증가 추세에 있는 신속성형기술을 효과적으로 지원하기 위한 3-D CAD 모델링 기법의 하나를 제시하였다. 모델링을 위한 제약조건을 산출하기 위해서는 현재 개발되었거나 혹은 개발중인 여러가지 신속성형 기계장치들에게 있어서 일반적으로 공통으로 요구되는 기하학적 조형형상 특징들에 의거한 수치제한조건을 수식화하였고 이에 기반을 둔 전용 모델링

기법을 지원하는 수치해석 기법과 전산설계 기법을 제시하였다.

본 논문은 CAD 측면에서, 새 가공기법인 신속성형기술의 출현에 기반을 둔 벌집구조형상이라는 새로운 기하학적 형상 모델의 응용 가능성과 이를 생성할 수 있는 모델링기법을 제시하고자 하였다. 또한 신속성형기술 측면에서는 성형장비전용의 특수한 기하학적 형상의 모델링 사례를 제시하여 신속 성형기술의 응용분야를 확장하고 신속성형장비 사양에 의거한 수치제약조건을 만족하는 정확한 형상 조형자료를 제공하기 위한 이론을 바탕으로 성형기술의 신속성 향상을 도모하고자 하였다. 추후 단위세포형상 및 격자 frame 구조가 고도로 복잡한 벌집형상의 모델링에 대해서는 본 논문에서 제시한 모델링 이론에 따른 전산설계기능의 보강 및 확장 작업이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음. (1997-003-E00070)

참고문헌

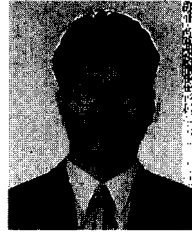
1. Kai, C.C. and Fai, L.K., *Rapid Prototyping, Principles and Applications in Manufacturing*, John Wiley & Sons Inc., 1997.
2. Jacob, P.F., *Stereolithography and other RP&M Technologies*, Society of Manufacturing Engineers in cooperation with the RP Association of SME, ASME Press, 1996.
3. Kochan, D., *Solid Freeform Manufacturing*, Manufacturing Res. and Tech. 19, Elsevier Science Publishers B.V. 1993.
4. Suh, Y.S. and Michael J. Wozny, "Adaptive slicing for solid freeform fabrication process", *SFF Symposium '94*, U. of Texas, Austin, pp. 404-411, August 1994.
5. Kulkarni, P. and Dutta, D., "An accurate slicing procedure for layered manufacturing", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 683-697, 1996.
6. Chandru, V. et al., "Voxel-Based Modeling for Layered Manufacturing", IEEE Computer Graphics and Applications, November 1995.
7. Jee, H. and Sachs, E., "Visually Simulated Surface Texture Models for 3D Printing", *7th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Aachen, Germany, pp. 49-62, July, 1998.
8. Catmull, Edwin E., "A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces", Ph.D. Thesis, Dept. of Computer Science, Univ. of Utah, December 1974.

9. Gleicher, Michael, "Integrating Constraints and Direct Manipulation", *Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics (ACM)* Cambridge, Massachusetts, pp. 121-129, 1992.

10. Sederberg, T.W., "Free-form deformation of solid geometric models", *Computer Graphics, ACM, Proc. SIGGRAPH*, Vol. 20, No. 4, pp. 151-160, 1986.

11. Witkin, A., Fleischer, K. and Barr, A., "Energy constraints on parameterized models", *Computer Graphics, ACM, Proc. SIGGRAPH*, Vol. 21, No. 4, pp. 225-232, July 1987.

12. DeGarmo, E.P., Black, J.T. and Kohser, R., *Materials and processes in manufacturing*, 7th Ed. Collier Macmillan Pub. Co., 1988.



지 해 성

1980년 서울대학교 공과대학 기계설계학과 학사
 1988년 서울대학교 공과대학 기계설계학과 석사
 1996년 미국 MIT 대학원 기계공학과 박사
 1988년~1992년 한국과학기술연구원(KIST) CAD/CAM 연구실 연구원
 1996년~1997년 미국 상무성산하 국제표준연구소(NIST) 연구원
 1987년~현재 홍익대학교 기계공학과 조교수
 관심분야: Rapid Prototyping, 최적설계, Geometric Modeling