

복합재 형상의 FEA기반 설계를 위한 통합 CAD 시스템

신기훈*, 김주한**

An Integrated CAD System for FEA-based Design of Heterogeneous Objects

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

ABSTRACT

CAD systems are routinely used by designers for creating part geometries. Interfaces to CAE/CAM systems are also commonplace enabling the FEA-based design optimization and the rapid fabrication of the designed part. However, conventional CAD systems have thus far focused on objects with homogeneous interior. Two recent advances—use of heterogeneous objects such as Functionally Graded Materials (FGM) in parts and Layered Manufacturing Technology (LMT)—have brought to the forefront the need for CAD systems to support the creation of geometry as well as the graded material inside. We first describe the need and the components of such a CAD system for heterogeneous objects. A prototype CAD system is then described with one specific example (thermal barrier type FGM, pressure vessel) in order to illustrate the use of the implemented CAD system. The implemented system is manually integrated with FEA tools for optimal design. Our ongoing work involves the automation of the integration with FEA tools.

Key words : CAD, FEA, Heterogeneous Objects, Functionally Graded Materials, Layered Manufacturing

1. 서 론

최적설계 분야에서의 개발방향은 제품의 기하학적 형상뿐 아니라, 그 내부의 재질분포를 동시에 최적화하는 방향으로 나아가고 있다¹⁾. 몇몇 최적설계 기법들은 단순한 설계문제에 대해서, 하중 및 경계조건을 입력하면 기하학적 형상 및 재질분포를 동시에 자동 출력한다. 하지만 대부분의 응용분야에서는 다양한 설계목적에 달성하도록 재질을 선택해야 하기 때문에²⁾, 설계자가 초기 형상 및 재질분포를 대략적으로 설계하는 유연한 시스템이 요구된다.

한편, 새로운 생산기술로서, 적층조형 방식(Layered Manufacturing, LM)은 SFF(Solid Freeform Fabrication)라고도 일컫어 지는데 완전한 3차원 복합재 형상(heterogeneous objects)을 생산할 수 있다. 적층조형 방식은 컴퓨터의 제어 아래 동시에 여러 가지 재질을

미세한 점의 형태로 쌓아서 원하는 재질성분 및 형상을 만들 수 있기 때문이다^{3),4)}. 여기서의 적층조형 방식은 시제품의 생산에 주로 사용되는 래피드 프로토타입(Rapid Prototyping, RP)⁵⁾ 방법으로서가 아니라 실제 복합재 형상을 생산할 수 있는 방법으로서 다루고자 한다. CNC 가공과 같은 전통적인 생산방식에서는 원래의 재질을 선택적으로 제거함으로써 최종형상을 가공한다. 이에 반하여 적층조형 방식은 여러 가지 재질을 선택적으로 이용하여 한 층씩 형상을 쌓아 올리는 2.5D 프로세스로 다른 전통적인 방식이 필요로 하는 공구의 교환 및 재료의 고정(fixturing) 등의 작업을 필요로 하지 않는다. 그러므로 CAD 모델에서 출발하여 실제 원하는 제품의 형상을 빠른 시간에 제작할 수 있다.

본 논문에서는 Fig. 1에 소개된 복합재 압력관(pressure vessel)⁶⁾을 예로 복합재 형상의 설계 및 적층조형 생산을 위한 통합 CAD 시스템의 원형(prototype)을 제안하고자 한다. 제안된 시스템은 현재까지 재료공학 분야에서 널리 알려진 재질관련 설계 정보를 최대한 활용하는 지식기반 시스템(knowledge-

*요신전자, 정희원, 서울산업대학교 기계공학과

**서울산업대학교 기계공학과

- 논문투고일: 2005. 04. 20

- 심사완료일: 2005. 05. 18

based system)으로, 설계자가 형상 및 재질분포를 대략적으로 선정 한 후 유한요소 해석(finite element analysis)을 거쳐 최적화하는 알고리즘을 사용한다.

Fig. 1의 압력관 내측에는 고온, 고압의 유체가 담겨져 있고, 외측은 상대적으로 낮은 압력 및 온도에 노출되어 있다고 가정하면, 압축관의 내측에 충분한 열 보호층(thermal protection layer)을 형성하기 위해서는 세라믹(ceramic) 재료가 추천되며, 압축관의 외측 재료로는 충분한 기계적 강도를 주기 위해 메탈(metal) 재료가 추천될 수 있다. 하지만 두 이방성 재질의 직접적인 접착은 경계면에서 발생하는 열잔류응력(thermal residual stress)의 차이로 인하여 경계면 박리(delamination) 현상을 초래하게 된다. 그러므로 두 이방성 재질을 점진적으로 혼합하는 기능성 경사 복합재 (Functionally Graded Material, FGM) 설계가 적용되어야 한다. 즉, 메탈 성분이 압축관의 내측에서는 0%로 출발하지만 점차적으로 증가하여 외측에서는 100%가 되도록 설계하는 것이 FGM설계이다. 오른쪽 그래프는 기계적 강도(mechanical strength), 열저항력(thermal resistance) 등과 같은 전형적인 재료물성치의 변화를 재료성분의 변화에 대하여 도시한 것이다. 이 압축관의 FGM 설계과정은, 먼저 설계자가 적당한 재질성분 함수(material composition function)를 데이터 베이스로부터 선택한 후 유한요소 해석(FEA)을 통하여 각종 응력(반경방향 응력, 원주방향 응력)을 최소화하도록 함수의 계수(coefficient)를 최적화하는 시행착오 방법(trial and error)을 수행한다. 이러한 작업을 수행하기 위해서는 복합재 형상을 효율적으로 표현(representation) 및 표시(visualization) 할 수 있는 CAD툴이 필요하며, 각종 재료공학 관련 데이터 베이스가 구축되어 있어야 하며, 재질성분 함수를 변경하여 가면서 최적값을 찾아낼 수 있는 통합 FEA 툴이 필요하다. 현재까지 기하학적 형상만을 다루는 문제에 있어서는 여러 가지 CAD 툴이 존재하나, 재질성분을 함께 다루는 틀은 거의 존재하지 않는다. 이러한 이유로 본 논문에서는 기하학적 형상뿐만 아

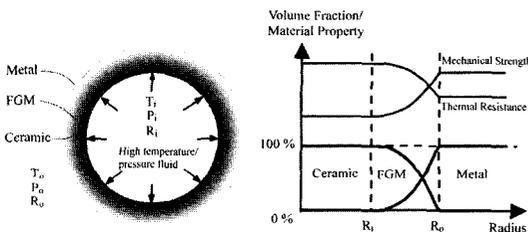


Fig. 1. Heterogeneous pressure vessel.

나라 형상내부의 재질성분도 함께 표현할 수 있는 통합 CAD 시스템의 원형을 소개하고자 한다.

먼저 2장에서는 복합재 형상의 최적설계에 적용되는 두 가지 방법을 소개하고, 3장에서는 제안한 통합 CAD 시스템의 구성요소를 살펴볼 것이다. 그리고 4, 5장에서는 실제로 구현된 CAD 시스템을 Fig. 1의 압력관 설계에 적용하는 과정을 상세히 기술하도록 하겠다. 마지막으로 요약과 향후 연구과제에 대해서 간단히 설명하겠다.

2. 복합재 형상 설계를 위한 두 가지 방법

복합재 형상의 최적설계를 위한 방법으로는 생성설계 방법(generative approach)과 변동설계 방법(variant approach)의 두 가지 방법이 있다.

2.1 생성설계 방법(generative approach)

Fig. 2는 생성설계 방법에 의한 복합재 형상의 설계 과정을 순차적으로 보여주고 있다. 이 방법에 의하면 설계영역(design domain), 설계목표(design objectives), 해의 구속조건(constraints on solution), 주성분 재료(primary materials), 하중(loadings), 경계조건(boundary conditions) 등이 입력으로 주어지면, Fig. 3에 보인 균질화 설계기법(homogenization design method, HDM)^[1,2]과 같은 최적화 설계기법에 의해 최적화된 형상 및 재질 분포가 자동으로 생성된다. Fig. 3은 균질화 설계기법에 의한 외팔보의 설계 예로 주어진 하중과 경계조건에 대해, 최적화된 재질밀도 분포(density distribution)가 출력된다.

출력된 픽셀(혹은 복셀) 데이터는 다시 역공학(reverse engineering) 기반 후처리 공정(예: Solid Builder Module^[11,12])을 거쳐 복합재 형상모델(Heterogeneous Solid Model, HSM)로 변환된다. 이

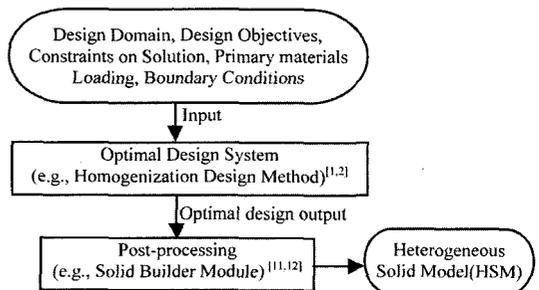


Fig. 2. Design process flowchart for generative approach.

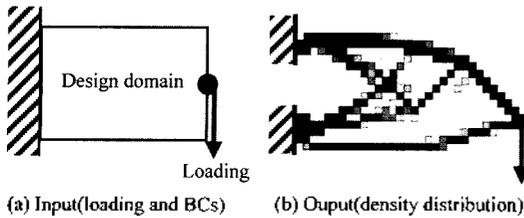


Fig. 3. Homogenization design method(HDM)^{11,12}.

러한 역공학 기반 후처리 공정에 의해 생성된 복잡한 형상모델은 다시 유한요소 해석이나 적응조형을 위한 CAD 데이터로 활용될 수 있다. 하지만, 이러한 역공학 기반 후처리 공정들은 흩어진 점들을 이용하여 외곽형상을 생성하는 데 초점이 맞추어져 있어, 내부의 재질밀도 분포를 표현하는 데는 한계가 있다. 그러므로 현재까지도 흩어진 재질분포 데이터의 효율적인 표현방법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

한편, 생성설계 방법은 다양한 설계목표를 동시에 달성하기 위하여 도입되는 기능성 경사 복합재(FGM)의 설계에도 응용될 수 있다¹⁵기. 앞선 Fig. 1의 압축관 예에서는 열보충층을 제공하는 동시에 응력을 최소화 시키기 위해 FGM 설계를 도입하였다. 하지만 생성설계 방법의 단점은 이러한 일련의 과정에서 설계자의 역할을 제한한다는 것과, 적용범위가 단순한 문제로 한정되며 계산량이 많다는 것이다.

2.2 변동설계 방법(variant approach)

변동설계 방법에서는 설계자의 독창성, 직관적 지식, 경험적 노하우(know-how) 등을 설계과정에 효과적으로 반영할 수 있다. 설계자가 단순히 자동 생성시스템의 결과를 분석하는 역할이 아니라, 직접 복합재

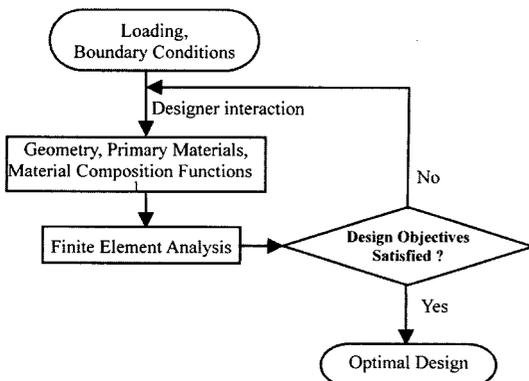


Fig. 4. Design process flowchart for variant approach.

의 초기 형상 및 재질성분 함수를 설계하여 유한요소 해석을 수행한다. 수행된 해석결과를 분석하여, 설계 목표를 만족하지 못했다면, 다시 설계인자를 수정하여 재해석을 수행한다. 이러한 설계-해석-수정-재해석 사이클을 반복함으로써 최적화된 설계를 얻을 수 있다(Fig. 4).

하지만, 현재까지는 위와 같은 설계-해석 사이클을 반복적으로 수행할 수 있는 통합 툴의 부족으로 설계자의 노하우를 충분히 활용하지 못하고 있다. 이러한 변동설계 방법에 기반한 복합재 형상설계를 위한 통합 CAD 툴의 구성요소로는 아래와 같은 것이 있다.

- 복합재 형상모델러(CAD 표현 및 구현 방법)
- 주성분 재료 및 물성 데이터 베이스
- 재질성분 함수 라이브러리
- 물성치 평가규칙(property estimation rule) 라이브러리
- 그래픽 유저 인터페이스(Graphic User Interface, GUI)

위의 구성요소 중 GUI는 설계자가 다른 데이터 베이스를 효율적으로 접근할 수 있도록 틀을 제공한다. 전술한 바와 같이 본 논문에서 소개된 복합재 형상설계를 위한 통합 CAD 시스템은 변동설계 방법에 기반하고 있기 때문에, 다음 장에서는 개발된 시스템에서 구현된 각 구성요소를 구체적으로 소개하도록 하겠다.

3. 통합 CAD 시스템의 구성요소

3.1 복합재 형상모델러(Heterogeneous Solid Modeler)

본 논문에서 소개된 통합 CAD 시스템의 핵심은 역시 복합재 형상을 표현하고 수정할 수 있는 효율적인 형상 모델러의 개발에 있다. 형상 모델러의 개념을 복합재의 표현으로 확장해야 되는 필요성은 Hoffmann과 Rossignac¹³에 의해 인식되기 시작하였다. 현재까지 복합재 형상의 표현을 위해 유한요소 기반(finite element-based), 복셀 기반(voxel-based), 분해 기반(decomposition-based), 건축 기반(construction-based) 표현법 등이 제안되었다¹⁴⁻¹⁸. Jackson¹⁵ 등은 사면체 유한요소 기반 표현법(tetrahedron mesh-based model)을 제안하였다. 이 표현법에서 각각의 사면체 요소는 네개의 노드(node)를 가지고 있으며, 각각의 노드는 위치 정보뿐 아니라 재질성분(material composition) 정보를 barycentric Bernstein 다항식을 이용하여 표현

한다. Wu^[6] 등은 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 표현과 복셀 기반 표현법을 혼합한 표현법을 제안하였다. 한편 Kumar와 Dutta^[4]는 복합재 형상표현을 위한 수학적 배경으로 r_m -object 모델을 제안하였다. 이 모델링 방법은 기하학적 형상의 표현에 사용되는 r -set^[9,20]의 개념을 재질정보의 표현을 위해 확장한 개념으로, 기하학적 형상내부의 분해를 통해 재질정보를 표현한다. Shin과 Dutta^[17]는 r_m -object 모델을 응용한 건축기반 표현법을 제안하였다. 본 논문의 통합 CAD 시스템은 Kumar와 Shin의 표현법에 기초하므로, 이들 표현법에 공통적으로 적용되는 r_m -object 모델에 대해 간략히 소개한다.

복합재 형상은 다수(n 개)의 주성분 재료(primary materials)로 구성되어 있다. 그러므로 임의의 한 점에서 재질 성분은 n 개의 주성분 재료 부피퍼센트(volume fraction)로 표현된다. 이 부피퍼센트는 n 차원 점 v 로 표시되며, 이들의 집합(V)은 R^n 공간의 부분 집합으로 아래와 같이 표현된다.

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

위 식 (1)에서 v_i 는 i 번째 주성분 재료의 부피퍼센트를 나타낸다. 그러므로 재질성분 함수 F 는 식 (2)와 같이 3차원 공간의 임의의 점 $x(x \in E^3)$ 를 n 차원 재질성분 점 $v(v \in R^n)$ 으로 대응시키는 일대일 매핑(one to one mapping)이 된다.

$$F: E^3 \rightarrow V \mid F(x) = v(x) = \{v_i\} \quad (2)$$

위의 기본적인 정의에 의해 복합재 형상을 나타낼 수 있는 최소 기본단위(primitive)로서 r_m -set 구조를 도입한다. r_m -set은 곱공간(product space) $T(= E^3 \times R^n)$ 의 부분집합 (P, B)로 정의되며, $P(\subseteq E^3)$ 는 형상을 표현하는 r -set이며, $B(\subseteq V)$ 는 r -set에 재질 정보를 매핑시키는 함수 $F(P)$ 와 동일하다.

이제 일반적인 복합재 형상을 표현하는 수학적 모델로서 r_m -set들의 조합(collection)인 r_m -object O 를 아래의 식 (3)과 같이 정의한다.

$$O = \{(P_1, B_1), \dots, (P_j, B_j)\} \quad (3)$$

where $P_j \subseteq E^3, B_j \subseteq V$

위와 같은 기본적인 r_m -set, r_m -object 모델과 더불어, 한층 복잡한 복합재 형상모델을 정의하기 위해

material union, difference, intersection과 같은 정규화된 불리언 작업(regularized Boolean operation)을 새롭게 정의하였다.

3.2 재질성분 함수 라이브러리

재료공학 분야에서 현재까지 알려진 유용한 재질성분 함수 라이브러리는 통합 CAD 시스템의 핵심적인 구성요소이다. Table 1에는 여러 참고문헌들에서 인용된 유용한 재질성분 함수들과 그들의 응용분야가 정리되어 있다. 전술한 바와 같이 설계자가 Table 1의

Table 1. Material composition functions from literature

Composition functions/ Property variations	Application
$v_A(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$	Thermal barrier FGM (metal-ceramic)의 thermomechanical stress와 heat flux의 최소화 ^[5]
$v_A(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^p$	Ni-Al ₂ O ₃ FGM 실린더를 가공으로부터 냉각 시 생기는 잔류 응력의 최소화 ^[22,23]
$v_A(y) = \frac{1}{2} \left\{ \sin\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{2y}{h}-1\right)\right) + 1 \right\}$ $v_A(v) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{2v}{h}-1\right)^2 + 1 \right\}$	Meta과 ceramic의 접착면에서의 열잔류응력의 최소화
$v_B(r) = \left(\frac{r-r_i}{r_o-r_i}\right)^2$ $v_B(r) = \frac{-r^2 + 2r_o r + (r^2 - 2r_o r_i)}{r_o - r_i}$	반경방향으로 온도 및 압력차가 있는 축대칭 실린더(MMC-SiC particulates)의 열응력 최소화 ^[7]
$v_B(x) = \left(1 - \frac{x}{W}\right)^n$	High heat flux에 있는 nuclear reactor liners(stainless steel - partially stabilized zirconia)의 transient stress의 최소화 ^[24]
$v_B(x) = \left(\frac{x-x_0}{x_1-x_0}\right)^p$	Thermal barrier type FGM(metal-ceramic)의 열응력 최소화 ^[25]
$\mu_B = \mu_A e^{(Ab)}$ (μ : shear modulus)	경계면에서 crack이 발생한 이방성 세질의 접합면에서의 접착력 향상 및 경계면 응력 최소화 ^[24]
$v_B(x) = \frac{ax}{t}$	Gas turbine engine (NiCrAlY-ZrO ₂ -Y ₂ O ₃)의 thermal barrier coatings ^[24]

데이터 베이스로부터 적합한 재질성분 함수를 선택한 후, 다음 장에 소개될 물성치 평가규칙을 적용하여 유한요소 해석을 위한 입력모델을 만들게 된다. 실제 해석결과가 원하는 목표치에 부합하지 못할 경우에는 재질성분 함수의 계수(coefficient)를 변화시켜가면서 반복적인 설계-해석-수정-재해석 과정을 거쳐서 최적의 설계치(예: 응력분포가 허용응력보다 낮음)를 얻는다. 현재까지의 설계과정에 있어 그 반복횟수를 늘리고, 재질성분 함수를 선택하고 수정하는 가이드 라인을 보강한다면 진정한 의미에서의 최적화 설계가 될 것이다.

이러한 반복 설계-해석 방법을 적용한 예로 열차단(thermal barrier) FGM을 들 수 있다^[5,8,22,26]. Markworth와 Saunders^[5]는 시편의 양끝이 각각 고온과 저온에 노출되어 있다고 가정된 1차원 메탈-세라믹 FGM 설계에 위의 반복 설계-해석 방법을 도입하였다. 이러한 열차단 FGM의 설계목표는 열응력을 복합체의 항복응력(yielding stress) 이하로 최적화 시키는 것이다. 그들은 메탈의 부피퍼센트를 포물선 함수(parabolic function)로 가정하여, 함수의 계수를 최적화 시켰다.

3.3 물성치 평가규칙 라이브러리

일단 재질성분 함수가 선택되면, 유한요소 해석용 모델의 생성을 위해 물성치(physical properties)의 평가가 이루어져야 한다. 복합체의 임의의 한 점에서의 물성치는 포함된 함유물(inclusion)의 상(phase) 크기와 모양, 방향(orientation), 공간적인 분포 등의 미세구조(microstructure)에 의존적이다. 그러므로 이러한 복합체의 미세구조로부터 물성치를 결정하는 규칙과 실험적인 데이터가 필요하다^[25,28]. 평가가 필요한 물성치로는 종탄성계수(Young's modulus) 및 횡탄성계수(shear modulus)와 같은 기계적 성질, 열팽창율과 열전도율과 같은 열역학적 성질, 전기전도율과 유전상수(dielectric constant)와 같은 전기적 성질, 확산상수(diffusion constant)와 같은 화학적 성질 등을 총망라한다. 하지만 본 논문에서 소개된 압축관 예에서는 기계적, 열역학적 성질만을 평가하는 것으로 한정하겠다.

여러 참고 문헌^[7,25,26,29,30]에 미세구조 기반 열역학적 물성치 평가규칙이 소개되어 있다. 대표적인 방법으로는 혼합규칙(Voigt 방법), 역변환 규칙(Reuss 방법), Kerner 방법, Mori-Tanaka 방법, Tamura 방법, self-consistent 방법, modulus-based 방법(열팽창 계수), 희석근사(dilute approximation) 방법 등이 있다. 이러한 평가모델에 기반하여, 여러 재질이 특정 부피퍼센트를 가지고 혼합되어 있는 복합재 형상의 물성치는

Table 2. Range of applicability of micromechanical models

Volume fraction, v	Micromechanical models
$v < 0.1$ $v > 0.9$	희석근사방법
$0.1 \leq v \leq 0.3$ $0.7 \leq v \leq 0.9$	Kerner 방법, Mori-Tanaka 방법, Tamura 방법, Self-consistent 방법, Modulus-based 방법, Voigt 방법, Reuss 방법
$0.3 \leq v \leq 0.7$	Fuzzy logic 방법

fuzzy logic 방법 등을 이용하여 보간법(interpolation)으로 계산할 수 있다. Table 2에는 다양한 불성치 평가규칙을 적용할 수 있는 부피퍼센트의 구간을 소개하고 있다.

3.4 그래픽 유저 인터페이스(GUI)

GUI는 설계자와 통합 CAD 시스템 간의 효율적인 상호작용을 위해서 필수적인 요소이다. 본 논문에서 소개될 GUI는 원래 Sun Workstation 상에서 Motif와 OpenGL 라이브러리를 사용하여 구현되었으며, 현재 MFC(Microsoft Foundation Class)를 이용한 PC Window용 버전으로 개발 중에 있다. GUI의 자세한 내용은 5장의 적용 예에서 압축관 설계과정과 함께 자세히 소개하겠다.

4. 복합재 형상을 위한 CAD 시스템

전술한 바와 같이 제안된 통합 CAD 시스템은 복합재 형상의 설계-해석-수정-재해석 과정을 반복적으로 수행하여 설계목표(형상 및 재질분포)를 달성하는 최적설계 기법(변동설계 방법)에 기반한 시스템이다. 본 장에서는 복합재 형상의 표현 및 해석틀과의 연계를 위해 개발된 통합 CAD 시스템의 원형(prototype)을 소개하고자 한다. 물론 제안된 CAD 시스템에는 핵심 요소로서 복합재 형상모델러(Heterogeneous Solid Modeler)가 포함되어 있다. 구현된 시스템에서 복합재 형상의 정보가 생성되어 적층생산에까지 연계되는 과정이 Fig. 5에 자세히 소개되어 있다.

위의 복합재 형상의 설계-해석-생산을 위한 통합 CAD 시스템에서 복합재 형상모델러는 r_{in} -object 프레임워크(architecture)를 기반으로, ACIS(Spatial Technologies Inc.) 커널 루틴과 C++ language를 사용하여 구현되었으며, GUI는 Motif와 OpenGL 라이브러리를 이용하여 Sun Workstation 환경에서 실행되도록 구현되었다. Fig. 5에서와 같이 형상모델러는 입력으로 생성설계 방법의 출력(예: HDM output) 및 임의의 형

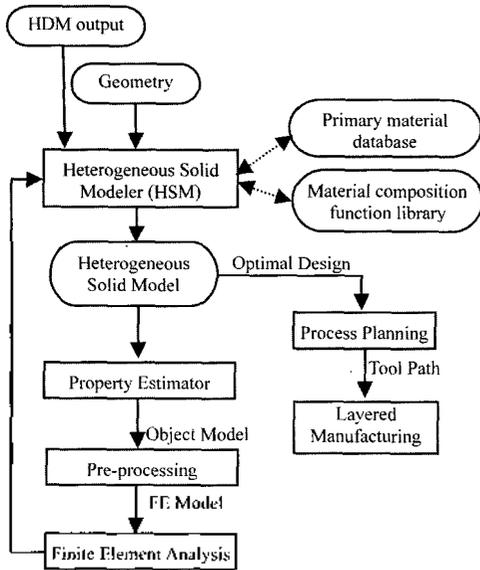


Fig. 5. Information flow in an integrated CAD system for heterogeneous objects.

상(geometry)을 받을 수 있으며, 주성분 재료 데이터 베이스와 재질성분 함수 라이브러리를 참조하여 복합재 형상모델을 생성한다. 생성된 모델은 물성치 평가 규칙을 적용하여 물성치 모델(Object Model, OM)²¹로 변환되고, 다시 유한요소 해석을 위한 전처리기(mesh 생성 알고리즘)를 거쳐 FE 모델로 변환된다. 현재까지의 구현에서는 물성치 모델로부터 FE 모델로의 변환은 수동(반자동)으로 이루어졌다.

구체적인 설계-해석-수정-재해석 단계는 다음과 같이 10단계로 구성된다.

- Step 1: primitive 형상의 입력.
- Step 2: 주성분 재료의 선택.
- Step 3: 재료성분 함수의 입력.
- Step 4: primitive 복합재 형상의 완성 및 표시(r_m -set).
- Step 5: 1-4의 단계를 필요한 모든 primitive를 만들기 위해 반복 수행한다.
- Step 6: 불리안 작업을 수행하여 복잡한 최종형상을 완성한다(r_m -object).
- Step 7: 복합재 형상모델을 물성치 평가모델로 변환.
- Step 8: 물성치 평가모델을 FE 모델로 변환.
- Step 9: 유한요소 해석을 수행하여 설계목표를 만족하는 지 확인한다.
- Step 10: 설계목표가 달성되지 않으면 재료성분 함수의 계수를 수정하여 8단계로 입력한다.

10단계에서 재료성분 함수를 수정하는 방법론에 있어 가이드 라인의 개발이 필요한데, 관련 연구는 현재 진행 중이다.

5. 적용 예

본 장에서는 구현된 통합 CAD 시스템의 적용 예로 Fig. 1에 소개된 압력관 모델의 설계-해석-수정-재해석 반복 사이클에 의한 최적화 과정을 상세히 기술하도록 하겠다. 압력관의 내측에는 고온, 고압(T, P)의 유체가 담겨져 있어 과도한 열응력이 발생할 수 있으므로 이를 최소화 시키기 위해 FGM 설계가 도입되었다. 한편 압력관의 외측은 기계적인 하중 없이 T 의 온도조건에 노출되어 있다. 압력관 모델은 기하학적 형상, 하중 및 경계조건이 모두 축대칭(axisymmetric)이므로 모든 불성치가 반경방향으로만 변화하는 특징을 가지고 있다. 압력관의 내측은 열보호층을 형성하기 위해 세라믹(Al_2O_3) 재질이 사용되었으며, 외측에는 충분한 기계적 강도를 확보하기 위해 메탈(Al 합금) 재료가 사용되었다. 설계목표는 원주방향 응력(circumferential stress)을 최소화하여 항복응력(yielding stress) 이하로 만드는 것이다.

5.1 압력관 모델의 생성

Fig. 1의 압력관에 해당하는 복합재 형상 모델의 생성 과정이 Fig. 6-9에 단계별 GUI와 더불어 소개되어 있다. 구현된 GUI는 몇 단계의 메뉴로 구성되어 있는데, 주메뉴는 "File", "Create Prim", "Manage Prim", "H-object", "CAPP" 등으로 구성되어 있다. "File" 메뉴를 선택하여 형상모델 파일(*.sat, ACIS geometry) 혹은 새롭게 정의된 복합재 형상모델 파일(*.rmo, ACIS geometry + material information)을 불러오거나 저장할 수 있다. "Create Prim"는 기본적인 primitive 복합재 모델(r_m -set)을 생성할 수 있는 기능을 제공하

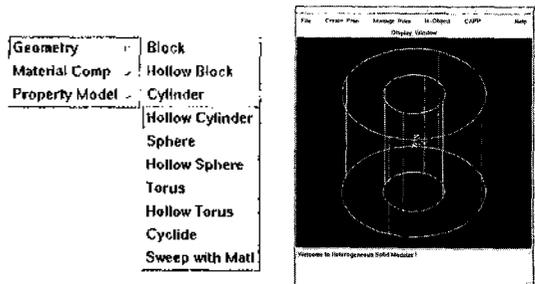


Fig. 6. Create a geometry for pressure vessel.

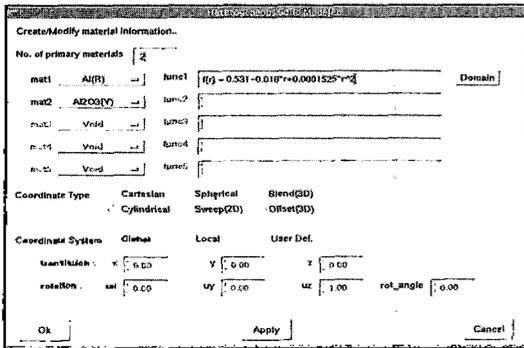


Fig. 7. Create material information.

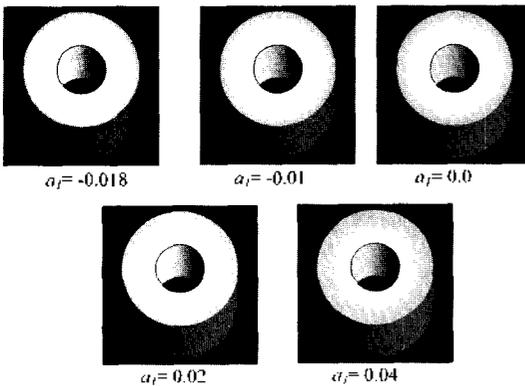


Fig. 8. Visualization of material distribution.

는 메뉴로, primitive형상(예: box, cylinder, hollow cylinder, sphere, torus 등), 재질성분 함수, 불성치 평가규칙 등을 설계자가 임의적으로 선택할 수 있도록 부메뉴가 구성되어 있다.

먼저 압력관 모델의 형상을 생성하기 위해 “Create Prim”-“Geometry”-“Hollow Cylinder” 순으로 메뉴를 선택하고, 치수(반경 및 높이)를 입력하여 중공관(hollow cylinder) 형상을 생성하였다(Fig. 6). 그리고 그 다음 단계로서 “Create Prim”-“Material Comp.” 순으로 메뉴를 선택하여 압력관 모델을 위한 주성분 재료 및 재질성분 함수의 초기치를 입력한다(Fig. 7). 현재까지의 구현에서는 먼저 사용할 주성분 재료의 숫자 n 을 입력한 후, $n-1$ 개의 재질성분 함수를 선택된 좌표 시스템(Cartesian, cylindrical, spherical coordinate system)에 따라 입력하게 된다. 본 예에서는 $n = 2$ 이고 알루미늄(Al)과 세라믹(Al_2O_3)이 주성분 재료로 선택되었다. 그리고 Al의 부피퍼센트(첫번째 재료의 재질성분 함수)를 정의하기 위해, 압축관 형상의 중심에 원통 좌표계를 설정하고 Table 1로부터 아래 식 (4)와 같은 2차 포물선함수(parabolic

function)를 선택하여 입력하였다.

$$v_{Al}(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 \quad (4)$$

위 식에서 v_{Al} 은 Al의 부피퍼센트, r 은 원통 중심으로부터의 거리를 나타내며, a_0, a_1, a_2 는 아직 결정되지 않은 미지의 계수들이다. 즉, 다음의 설계-해석 사이클에서 최적화된 계수를 찾아야 한다. 압력관의 내측($r = R_i$)에서 Al의 부피퍼센트는 0(0%)이고, 외측($r = R_o$)에서는 1(100%)이 되어야 한다는 구속조건을 적용하면, 식 (4)는 아래의 식 (5)와 같이 a_1 하나의 미지계수를 사용하여 다시 쓸 수 있다.

$$v_{Al}(r) = \left(\frac{a_1 R_o R_i (R_i - R_o) - R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right) + a_1 r + \left(\frac{1 - a_1 (R_o - R_i)}{R_o^2 - R_i^2} \right) r^2 \quad (5)$$

그러므로 미지계수 a_1 를 자유롭게 변화시켜 가면서 원주방향 응력(circumferential stress)이 최소화되는 값을 찾으면 설계목표가 달성된다. 이러한 반복적인 과정에서 미지계수 a_1 이 바뀔 때마다 같이 변화하는 재질분포(material distribution)는 언제든지 컴퓨터 상에서 설계자의 눈으로 확인이 가능하다(Fig. 8). 본 예에서는 Fig. 8에서와 같이 다섯 가지 a_1 값($= -0.018, -0.01, 0.0, 0.02, 0.04$)에 대한 Al- Al_2O_3 재질 분포를 표시하였다.

다음 단계는 생성된 복합재 형상모델을 물성치 평가 모델(object model)로 변환하는 작업이 필요하다. 이 작업은 “Property Model” 메뉴를 선택하여, 평가하고자 하는 물성치(Young’s modulus, Poisson’s ratio, 열팽창률, 열전도율) 및 적절한 평가룰(Voigt rule, Reuss rule, Kerner’s equation, Mori Tanaka method, Modulus-based rule)을 적용함으로써 실행된다(Fig. 9). 이렇게 생성되는 물성치 평가모델(object model)은 유한요소 해석을 위해 필요한 FE 모델의 바로 직전단계 모델로서, 적절한 전처리 알고리즘(mesh

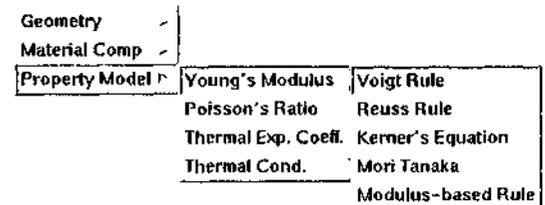


Fig. 9. Apply property estimation rules(Young’s modulus).

generation 등)을 적용하여 FE 모델로 변환되게 된다. 압력관 모델에서는 종탄성계수(Young's modulus)와 포아송비(Poisson's ratio)의 평가에 Kerner 방법, 열전도율(thermal conductivity)의 평가에 Voigt 방법, 열팽창계수(thermal expansion coefficient)의 평가에 modulus-based 방법을 각각 적용하였다.

압력관 모델의 재료로 사용되는 Al-Al₂O₃ 재료의 각 상(phase)에 따른 기계적, 열역학적 물성치는 Kwon¹⁷⁾의 연구에 자세히 소개되어 있다. 전술한 바와 같이 물성치 평가모델로부터 FE 해석을 위한 입력파일은 수동(반자동)으로 만들어 졌다. 그러므로 이 과정의 자동화 작업이 향후 연구과제로 남아 있다.

5.2 압력관 모델의 유한요소 해석

본 연구에서는 Abaqus(Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc.) 상용 소프트웨어를 이용하여 이전 단계에서 생성된 복합재 압력관 모델의 선형 탄성 유한요소 해석(linear elastic finite element analysis)을 수행하였다.

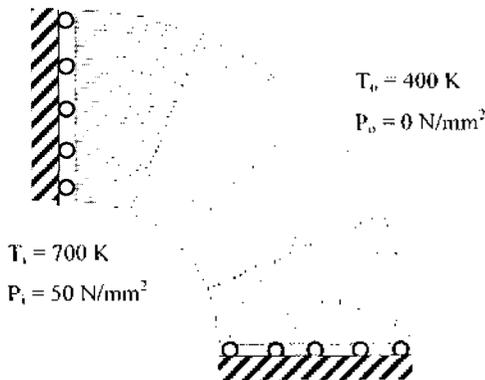


Fig. 10. Finite element model for pressure vessel.

압력관 모델의 형상은 축대칭이기 때문에 전체 형상의 4분의 1 단면만 고려하여 유한요소 모델을 생성하였다(Fig. 10). 응력해석을 위해서는 여덟개의 노드를 가지는 평면변형 요소(8 noded plain strain element, Abaqus element 라이브러리 중의 CPE8)를 사용하였으며, 열해석을 위해서는 여덟개의 노드를 가지는 2차원 확산 열전달 요소(8 noded two-dimensional diffusive heat transfer element, Abaqus element 라이브러리의 DC2D8)를 사용하였다. 전체 유한요소 모델은 Fig. 10에서와 같이 잘려진 양쪽 끝 모서리에서 대칭인 경계조건을 가지며, 반경방향으로는 32개, 원주방향으로는 4개의 CPE8 요소를 가진다. 즉

원주방향으로는 불성치가 변화하지 않기 때문에 단 4개의 요소만 사용하였다. 실린더의 내측에는 50 N/mm²의 분산 압력과 700 K의 고온 조건을 부과하였으며, 외측에는 400 K의 온도 조건을 부과하였다. 불성치는 반경방향으로 변화하며, 같은 반경을 가지는 요소들은 같은 물성치를 가지도록 그룹화 하였다. 그러므로 반경방향으로 인접하는 요소들의 불성치에는 불연속적인 점프가 나타나게 된다.

재료 성분 함수의 a_1 계수($a_1 = -0.018, -0.01, 0, 0.02, 0.04$)를 변화시켜가면서 유한요소 해석을 수행한 결과, 반경 방향으로의 온도분포 및 응력분포는 Fig. 11~13과 같은 결과를 보였다. a_1 값이 -0.019 보다 작거나, 0.043 보다 큰 경우에는 유효하지 않은 부피퍼센트($\nu > 1$ 혹은 $\nu < 0$)가 계산되기 때문에 본 해석에서는 배제하였다.

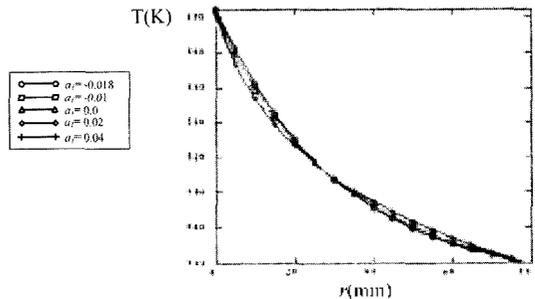


Fig. 11. Temperature distribution.

Fig. 11에서와 같이 a_1 값의 변화에 따른 온도 분포의 변화는 극히 미미하지만, Fig. 12와 13과 같이 원주방향 응력($\sigma_{\theta\theta}$) 및 반경방향 응력(σ_{rr})의 변화는 a_1 값의 변화에 크게 좌우된다. 원주방향 응력의 절대적인 크기가 반경방향 응력보다 크기 때문에, 원주방향 응력의 분포가 재료의 파괴에 좀 더 치명적이다. 그러므로 재료성분 함수의 a_1 계수를 시스템적으로 변화시켜서 재료성분을 바꾸면 원주방향 응력의 위치 및 최대값을 설계 목표치(항복응력) 이하로 감소시킬 수 있다. 본 예에서 시험한 다섯 개의 계수 값 중 $a_1 = -0.018$ 일 때 $\sigma_{\theta\theta}$ 가 최솟가 되었으며, 비슷한 경향이 σ_{rr} 값의 변화에서도 관측되었다. $a_1 = -0.018$ 에 따른 다른 두 계수 a_0, a_2 값은 식 (5)에 의해 계산된다. 본 예에서 사용된 2차 포물선 재료성분 함수 외에 1차 함수(linear function) 혹은 3차 함수(cubic function)도 재료성분 함수로 사용될 수 있다. 만약 3차 함수를 사용한다면 2개의 계수에 대한 최적화 과정이 필요하므로 현층 복잡한 문제가 된다.

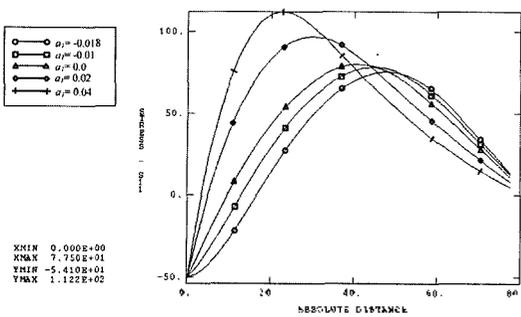


Fig. 12. Circumferential stress distribution ($\sigma_{\theta\theta}$).

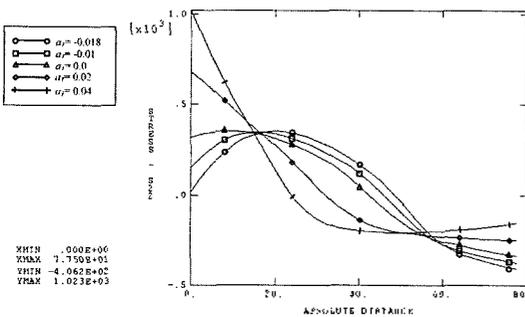
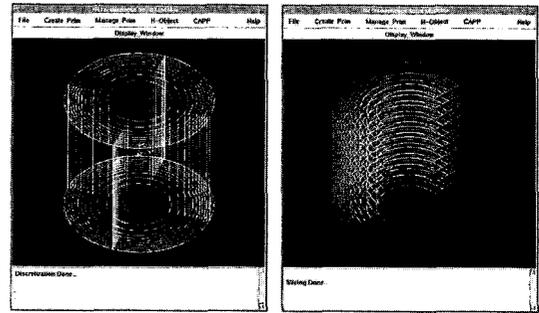


Fig. 13. Radial stress distribution (σ_r).

5.3 적층 조형을 위한 공정계획

본 논문에서는 복합재 형상의 최적설계를 위한 통합 CAD 시스템에 대해서만 소개하였다. 실제적인 복합재 형상의 적층조형 방식에 대해서는 다루지 않았지만, 적층조형을 위한 공정계획에 대해서 간단히 설명하도록 하겠다. 공정계획(process planning)은 통합 CAD 시스템을 CAM 시스템과 연결하는 중간과정으로 여러 단계로 구성된다. 먼저 형상내부에 연속적인 재질성분의 변화를 가지는 FGM 형상을 계단보양(stepwise)의 재질변화를 가지도록 변환하는 부피퍼센트 근사화(discretization) 과정을 거친다. 조형시간을 최소화하고 최종형상의 면조도(surface finish)를 향상시킬 수 있는 조형방향의 선정(orientation), 지지구조의 생성(support generation), 적응 슬라이싱(adaptive slicing), 적층경로 생성(tool path generation) 등의 과정을 거치게 된다. Fig. 14에는 압력관 모델의 적층조형을 위한 공정계획의 여러 단계들 중 부피퍼센트 근사화(discretization) 및 적응 슬라이싱 과정을 보여주고 있다.

Fig. 14-(a)에서와 같이 압력관 모델은 부피퍼센트 근사화(근사 정도 = 10%) 과정을 거쳐 11개의 독립된 형상으로 분리된다. 분리된 각 형상들은 동일한 재



(a) discretization (b) adaptive slicing

Fig. 14. Process planning for layered manufacturing.

질 성분을 갖게된다(1. Al - 90%, Al₂O₃-10% 2. Al - 80%, Al₂O₃-20% 등). 이러한 근사화 과정은 실제 조형머신들의 제작 정도(fabrication resolution)에 한계가 있기 때문에 유효하다.

6. 결 론

본 논문에서는 복합재 형상의 최적설계를 위한 통합 CAD 시스템을 소개하였다. 제안된 통합 시스템은 설계자가 주성분 재료의 데이터 베이스, 재질성분 함수 라이브러리, 물성치 평가규칙 라이브러리 등을 참조하여 설계-해석-수정-재해석 과정을 반복 수행하는 시행착오 방법에 의해 최적화된 형상 및 재질 분포를 얻는 지식기반 변형설계 시스템(knowledge-based variant approach system)이다. 제안된 시스템은 최적화된 복합재 형상을 적층조형 방식으로 생산할 수 있도록, 형상내부의 연속적인 재질변화를 허용 가능한 오차범위 안에서 근사화하고 슬라이싱하는 기능을 제공한다.

제안된 CAD 시스템의 적용 예로서 열보호층을 가지는 기능성 경사 복합재(FGM) 압력관의 최적 설계 과정을 소개하였다. 먼저 재료공학 분야에서 널리 사용되고 있는 데이터 베이스로부터 Al 및 Al₂O₃를 주성분 재료로 선택하였으며, 2차 포물선 타입의 재질 성분 함수를 선택하였다. 다음으로 유한요소 해석을 위한 전 단계로 물성치 평가 규칙을 적용하여 평가모델(object model)을 생성하였다. 실제적인 유한요소 해석 모델은 수동(반자동)으로 생성되었으며, 반복적인 수정-재해석의 과정을 거쳐 재질성분 함수의 계수를 최적화 하였다. 현재 물성치 평가모델(object model)로부터 유한요소 해석모델(FEM model)을 생성하는 과정의 자동화는 진행 중에 있다.

향후의 연구 과제로는 현재 기본적으로 구현되어

있는 CAD 시스템의 기능을 보완하고, CAM 시스템의 기능을 추가하여, 완전한 통합 CAD/CAM 시스템을 구현하는 것이다. 통합 CAD/CAM 시스템을 구축하기 위해서는 좀 더 효율적으로 복합체 형상을 표현할 수 있는 CAD 표현방법의 개발이 선행되어야 하며, 스캔 데이터(scanning data)로부터 복합체 형상 모델을 생성할 수 있는 역공학(reverse engineering)과의 통합도 필요하다. 또한 다양한 적층조형 머신(예: DMD³², SDM, 3DP)에 사용될 수 있는 공정계획 방법 및 STEP-NC³³와 같은 호환 가능한 머신코드 생성 표준의 개발이 절실하다.

참고문헌

1. Bendsoe, M. and Kikuchi, N., "Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197-224, 1998.
2. Bendsoe, M., Diaz, A. and Kikuchi, N., "Topology and Generalized Layout Optimization of Elastic Structures", *Topology Design of Structures*, Kluwer Academic Publishers, pp. 159-206, 1993.
3. Cherkaev, A., "Relaxation of Problems of Optimal Structural Design", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 31, No. 16, pp. 2251-2280, 1994.
4. Cherkaev, A. and Kohn, R., *Topics in the Mathematical Modeling of Composite Materials*, Birkhauser, Boston, MA, 1997.
5. Markworth, A. J. and Saunders, J. H., "A Model of Structure Optimization for a Functionally Graded Material", *Materials Letters*, Vol. 2, pp. 103-107, 1995.
6. Tanaka, K., Watanabe, H., Sugano, Y. and Poterasu, V. F., "A Multicriterial Material Tailoring of a Hollow Cylinder in Functionally Gradient Materials: Scheme to Global Reduction of Thermoelastic Stresses", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 135, pp. 369-380, 1996.
7. Kwon, P. Y., "Macroscopic Design and Fabrication of Functionally Gradient Materials", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 1994.
8. Suh, Nam P., "Applications of Axiomatic Design, Integration of Process Knowledge into Design Support Systems", 1999.
9. 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.
10. 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.
11. Marsan, A. and Dutta, D., "Construction of a Surface Model and Layered Data from 3D Homogenization Output", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 118, No. 3, pp. 412-18, 1996.
12. Marsan, A. and Dutta, D., "Computational Techniques for Automatically Tiling and Skinning Branched Objects", *Computer & Graphics*, Vol. 23, No. 1, 1999.
13. Hoffmann, C. M. and Rossignac, J. R., "A Road Map to Solid Modeling", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 2, 1996.
14. 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.
15. 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", *Material & Design*, Vol. 20, No. 2/3, pp. 63-75, 1999.
16. Wu, Z., Seah, H. S. and Lin, F., "NURBS-Based Volume Modeling", *International Workshop on Volume Graphics*, Swansea, pp. 321-330, 1999.
17. Shin, K. H. and Dutta, D., "Constructive Representation of Heterogeneous Objects", *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering (JCISE)*, Vol. 1, No. 3, pp. 205-217, 2001.
18. Park, S. M., Crawford, R. H. and Beamann, J. J., "Functionally Graded Material Representation by Volumetric Multi-Texturing for Solid Freeform Fabrication", 11th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium Austin, TX, 2000.
19. Requicha, A., "Representations for Rigid Solids: Theory, Methods and Systems", *Computing Surveys*, Vol. 12, No. 4, 1980.
20. Hoffmann, C. M., *Geometric & Solid Modeling*, Morgan Kaufmann Publishers, 1989.
21. Kumar, V., Burns, D., Dutta, D. and Hoffman, C., "A Framework for Object Modeling", *Computer Aided Design*, Vol. 31, pp. 541-556, 1999.
22. Drake, J. T., Williamson, R. L. and Rabin, B. H., "Finite Element Analysis of Thermal Residual Stresses at Graded Ceramic-Metal Interfaces", Part II, Interface Optimization for Residual Stress Reduction, *Journal of Applied Physics*, Vol. 74, No. 2, pp. 1321-1326, 1993.
23. Williamson, R. L., Rabin, B. H. and Byerly, G. E., "FEM Study of the Effects of Interlayers and Creep in Reducing Residual Stresses and Strains in Ceramic-Metal Joints", *Composites Engineering*, Vol. 5, No. 7, pp. 851-863, 1995.
24. Holt, B., Koizumi, M., Hirai, T. and Munir, Z., Editors, "Functionally Gradient Materials", *Ceramic*

- Transactions*, Vol. 34, 1993.
25. Hirano, T. and Wakashima, K., "Mathematical Modelling and Design", Special Issue on Functionally Graded Materials, MRS Bulletin, pp. 40-42, 1995.
 26. Suresh, S. and Mortensen, A., "Functionally Graded Metals and Metal-Ceramic Composites: Thermomechanical Behavior", *International Materials Reviews*, Vol. 42, No. 3, pp. 85-116, 1997.
 27. Weng, G. J., Taya, M. and Abe, H., Editor, Springer-Verlag, *Micromechanics and Inhomogeneity*, 1990.
 28. Nemat-Nasser, S. and Hori, M., *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*, Elsevier Scientific Publishers, 1993.
 29. Zuiker, J. R., "Functionally Graded Materials: Choice of Micromechanics Model and Limitations in Property Variation", *Composites Engineering*, Vol. 5, No. 7, pp. 807-819, 1995.
 30. Markworth, A. J., Ramesh, K. S. and Parks, W. P., "Modelling Studies Applied to Functionally Graded Materials - Review", *Journal of Material Science*, Vol. 30, pp. 2183-2193, 1995.
 31. 이관행, "Rapid Prototyping 기술에 대한 고찰", 한국CAD/CAM학회지, 제2권, 제2호, 1996.
 32. 지혜성, 서정훈, "레이저를 이용한 직접금속조형(DMD)기술", 한국CAD/CAM학회논문집, 제8권, 제3호, pp. 150-156, 2003.
 33. 김준환, 천상욱, 한순홍, "STEP-Compliant CNC를 위한 STEP-NC Repository 구축", 한국CAD/CAM학회논문집, 제8권, 제1호, pp. 48-54, 2003.



신 기 훈

1990년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1992년 서울대학교 기계설계학과 석사
 2002년 Univ. of Michigan, Ann Arbor
 기계공학과 박사
 1990년 3월~2005년 2월 (주)태우일렉트
 로닉스 책임연구원
 2005년 3월~현재 서울산업대학교 기계공
 학과 전임강사

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



김 주 한

1996년 아주대학교 기계공학과 학사
 1997년 UMIST 기계공학과 석사
 2004년 Purdue University 기계공학과
 박사
 2005년 3월~현재 서울산업대학교 기계공
 학과 전임강사