

다중노즐 적층을 위한 이종재료 설계 및 공정계획 방법 연구 Material Modeling and Process Planning of Heterogeneous Material for Multi-Nozzle Deposition

*김형중¹, 김지수¹, #안성훈²

*H. J. Kim¹, J. S. Kim¹, #S. H. Ahn(ahnsh@snu.ac.kr)²

¹ 서울대학교 기계항공공학부 대학원, ² 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소

Key words : Heterogeneous material, Multi-nozzle deposition, Material modeling, Process planning

1. 서론

이종재료는 하나의 부품에 둘 이상의 재료 조성을 부여하여 사용 환경에 대한 적합성이나 기계적 물성을 향상시킬 수 있다. 체내 적합성이 중요한 의약품 이식부품이나 지지구조와 구동기 역할을 동시에 하는 스마트 재료 등의 연구와 함께, 이종재료에 대한 관심도 증가하고 있다¹.

이종재료의 제조를 위해서는 Selective Laser Sintering (SLS)나 Fused Deposition Modeling(FDM) 방식 등을 사용하는 장비들이 제안되었다². 이종재료를 제작하기 위한 소프트웨어 기술로는 모델링, 공정 계획 등이 주로 연구되었다.

이종재료의 설계는 크게 형상 설계와 재료 설계로 구분된다. 형상 설계는 기존의 CAD 시스템에서 제공되는 방식과 동일하나, 재료 설계는 이종재료의 정의를 위한 방법들이 추가로 요구된다. 이종재료 설계 방법 중, 평가 모델(evaluated model)은 불연속함을 갖는 근사 형태를 기반으로 하는 반면, 비평가 모델(unevaluated model)은 다양한 수학적 표현 형태를 기반으로 한다³. 평가 모델은 주로 복셀(voxel)이나 요소망(volume mesh)을 사용하여 비평가 모델에 비해 다양한 규칙/불규칙적인 재료 조성을 표현할 수 있다.

이종재료의 제작을 위한 공정계획은 설계안과 제조를 연결해주는 중심 역할을 한다. 이종재료의 공정계획으로는 경로 생성, 재료 적층 순서, 사전 검증 등에 대한 연구들이 이루어졌다. Choi 와 Cheung 은 3 개 이상의 재료를 슬라이싱(slicing)한 폐곡선들을 이용한 경로 생성과 가상 시작점 평가에 대해서 연구하였다⁴. 하지만, 주로 폐곡선의 계층구조를 중심으로 한 경로 생성에 대해서만 다루었으며, 여러 재료를 사용하는 장비를 위한 재료의 적층 순서를 생성하는 연구는 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 계층 형태를 갖는 경계기반(boundary-based) 이종재료의 모델링 방법과 개별 재료의 적층 조건을 고려한 공정순서 생성 방법에 대해서 논하였다.

2. 이종재료 모델링

이종재료의 재료 조성은 부품의 사용 환경에 대한 경계영역과 경계영역으로부터 부품 내부로 재료 조성의 변화를 정의하는 것으로 구체화될 수 있다. 자연에서 같은 종의 동식물들이 주변 환경에 따라 그 생김새나 습성이 다르게 나타나는 현상이 하나의 예가 될 수 있다.

이러한 특징을 기초로, 본 연구에서는 경계기반 이종재료 모델링을 제안한다.

2.1 자료구조

형상설계 정보는 쾌속조형(Rapid Prototyping, RP)에서 표준교환형식으로 사용되는 STL(Stereolithography)을 이용한다. 재료 조성을 정의하기 위한 경계기반 이종재료 모델(boundary-based heterogeneous model)의 기본 구조는 STL 모델을 기반으로 사면체 요소망(tetrahedral mesh)을 단위구조로 하여 생성된다(Fig. 1(a)). 재료 조성시 검색이 용이하도록 이웃하는 요소망 사이에는 연결 구조가 정의된다. 재료 정보는 다중노즐 적층에서 사용되는 재료들의 부피비로 정의되며, 그 합은 1로 제한된다.

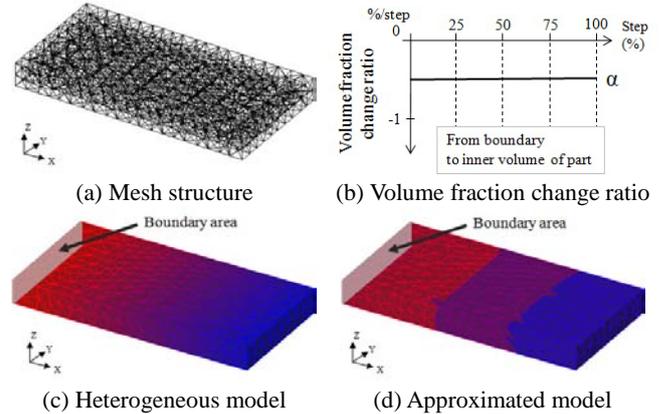


Fig. 1 Procedure of heterogeneous material modeling

2.2 재료 모델링 절차

재료 모델링은 형상 전체에 초기 재료가 정의되고, 경계영역으로부터 기능성 재료가 추가되는 순서로 진행된다. 여기서 기능성 재료는 부품의 사용 목적에 따라 유연함이나 전기 전도성, 기계적 물성을 강화시키기 위한 재료가 사용된다. 세부적인 절차는 다음과 같다:

- 초기화: 전체 형상을 구성하는 초기 재료와 사용 환경에 대응되는 경계영역이 정의된다. 그리고 내부영역 방향으로 재료 모델링을 위한 네트워크가 구성된다.
- 재료 정의: 재료 정의는 경계영역으로부터 부피비가 일정하게 수렴하거나 형상 전체에 정의될때까지 수행된다. 부피비 변화율(rate of volume fraction change)은 경계영역으로부터 기능성 재료의 조성을 계산하는데 사용된다. Fig. 1(b)는 값 α 로 정의된 부피비 변화율의 예를 보여준다. 상대적인 부피비 변화율을 사용함으로써 직선 및 곡선 뿐만 아니라 꺾은선 등의 복잡한 표현도 가능하다. Fig. 1(c)는 경계영역으로부터 일정하게 변하는 이종재료 모델(초기 재료: blue color, 기능성 재료: red color)을 보여준다.
- 근사화: 제조고려설계(Design for Manufacturing, DFM)의 관점에서 구성된 이종재료 모델은 반드시 제작 장비에 적합한 가공성(manufacturability)을 갖을 수 있어야 한다. 마지막 단계에서는 사용 가능한 재료 조성에 맞춰 모델을 근사화시킨다. Fig. 1(d)는 Fig. 1(c)의 모델을 3 개의 재료 조성으로 근사화시킨 결과를 보여준다.

3. 이종재료 공정계획

서로 다른 물성을 갖는 재료들을 조합하기 위해서는 설계된 이종재료의 조성을 달성할 수 있도록 각 재료들의 적층 특성을 고려한 적층 순서의 결정이 중요하다. 기존의 쾌속 조형에서는 주로 부품과 보조 재료들만을 사용하였기 때문에 이러한 적층 순서 문제가 크게 부각되지 않았지만, 이종재료는 사용되는 각 재료들의 적층 조건이 공정 계획 상에서 고려되어야 한다. 그리고 적층 순서는 가공 시간과 품질 측면에서 평가될 수 있다.

적층순서를 생성하기 위해, 우선 순위(precedence)를 결정하기 위한 지식기반(knowledge-based, KB) 및 형상기반(geometry-based, GB) 규칙을 정의하고 각 층별로 적층될 재료들을 분석하였다. 분석된 결과를 바탕으로 정의된 규칙들에 위배되지 않는 조건들 중 최소 가공시간을 보이는 조건을 선택하였다.

- **KB rule:** 재료별 경화시간을 고려하여 같은 층에서 재 경화시간이 긴 재료를 우선하여 적층한다.

상이한 재료들을 순차적으로 적층할 경우 반드시 각 재료들이 적층 및 경화되는데 필요한 시간이 충분히 제공되어야 한다. Fig. 2 는 순차적인 적층 과정에서 경화시간이 긴 재료를 먼저 적층하는 경우 적층시간이 짧은 것을 보여준다($T_{Set \#1} > T_{Set \#2}$).

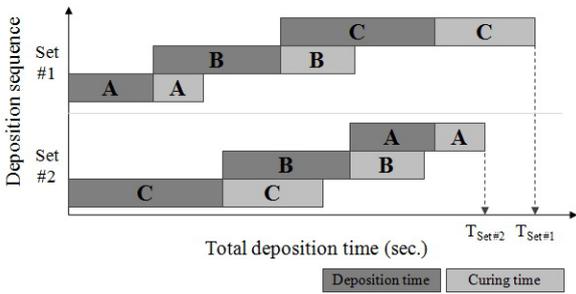


Fig. 2 Comparison of total deposition time of two sequences in a same layer

- **GB rule:** 높이 방향으로 순차적으로 적층을 진행할때, 앞서 적층된 층의 재료 중 먼저 적층된(경화가 더 진행된) 영역의 윗쪽에 위치하는 재료부터 적층한다.

위/아래 층에 위치하는 재료들은 중력이나 적층시 작용하는 열 등의 문제로 인해 먼저 적층된(아래에 위치한) 재료의 변형을 일으킬 수 있다. 따라서, 새로운 층의 적층시 적층된 재료들의 경화상태를 고려하여 먼저 적층되었던 재료의 윗쪽에 위치하는 재료부터 적층하도록 한다. Fig. 3 은 A, B, C 순서로 재료가 적층된 경우, $i+1^{th}$ 층에서 i^{th} 층의 A 재료 위의 A_1 을 A_2 보다 우선 적층하는 것을 보여준다.

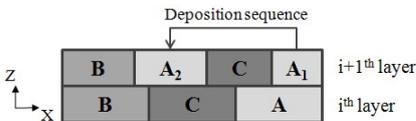


Fig. 3 Deposition sequence of two same material blocks on different material blocks

4. 구현 및 평가

제안된 알고리즘들은 C# 언어를 기반으로 이중재료 모델링과 이중재료 적층순서 생성 모듈에 구현되었다. 구현된 모듈에서는 재료 모델링 후 적층순서를 결정하고, 적층 경로를 생성한다. 제한된 적층 우선 순위들은 공정계획의 일부로 적용되었다.

기본 형상은 SolidWorks 에서 날개 형상을 모델링하여 STL 포맷으로 변환하였다(Fig. 4(a)). 이중재료의 모델링은 형상을 유지하면서도 구동기를 장착하여 변형이 가능한 유연한 날개 구조를 얻기 위해 뒷쪽(+X 방향)으로 서로 다른 강성의 3 재료 조성(A: ABS, B: Pebax, C: Pebax - 공극 50%)을 사용하였다(Fig. 4(b)). 적층순서는 3 가지 재료에 대해서 평가되었으며 그 결과를 기반으로 적층시간이 짧은 조건을 검색하여 사용하였다(Fig. 4(c)). Fig. 4(d)와 4(e)는 설계된 재료를 제작하기 위해 생성된 다중노즐 적층경로를 보여준다.

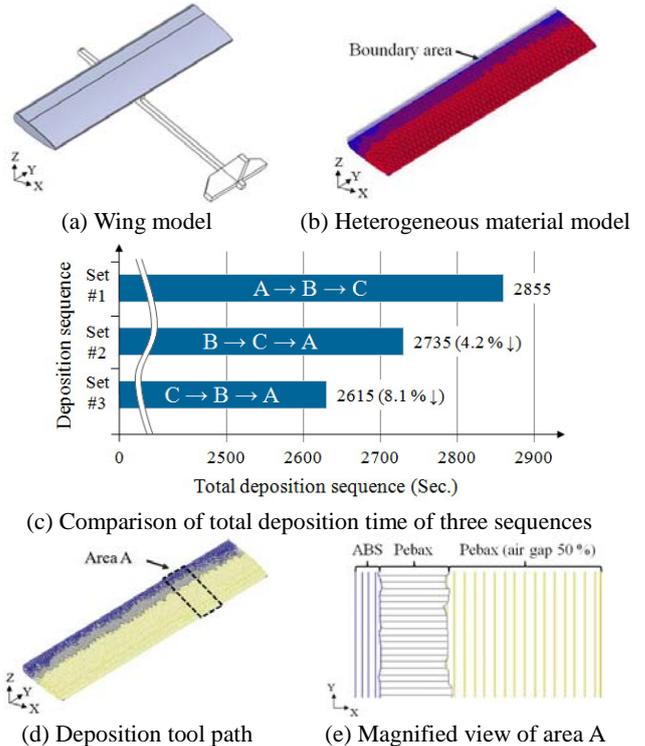


Fig. 4 Heterogeneous material modeling and process planning of wing model

5. 결론

이중재료는 단일 부품에 둘 이상의 재료조성을 부여함으로써 주변환경에 대한 높은 적합성이나 기계적 성능을 갖을 수 있다. 본 연구에서는 다중노즐 적층을 이용하여 이중재료의 제작을 위한 재료설계와 공정계획 방법을 제안하였다. 계층형태의 재료조성을 설계하기 위해 경계영역과 재료조성의 변화율로 정의되는 경계기반 이중재료 모델을 제안하였다. 다중노즐 적층용 공정계획에서는 재료별 경화시간을 포함한 재료의 적층조건을 기반으로 하는 지식기반 규칙과 층별 재료의 적층위치를 고려하는 형상기반 규칙으로 정의된 적층순서 생성방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 서로 다른 강성을 갖는 재료로 구성된 스마트 재료의 모델링과 공정계획에 적용하고, 그 결과를 정리하였다.

후기

본 연구는 서울대학교 2 단계 BK 21 사업과 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2009-0087640)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chu, W. S., Jeong, S. Y., Pandey, J. K., Ahn, S. H., Lee, J. H., and Chi, S. C., "Fabrication of composite Drug Delivery System using Nano Composite Deposition System and in vivo characterization," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, **9**, 81-83, 2008.
2. Jafari, M. A., Han, W., Mohammadi, F., Safari, A., Danforth, S. C., and Langrana, N., "A novel system for fused deposition of advanced multiple ceramics," Rapid Prototyping Journal, **6**, 161-174, 2000.
3. Kou, X. Y. and Tan, S. T., "Heterogeneous object modeling: A review," Computer-Aided Design, **39**, 284-301, 2007.
4. Choi, S. H. and Cheung, H. H., "Multi-material virtual prototyping for product development and biomedical engineering," Computers in Industry, **58**, 438-452, 2007.