

SIAG GD에서 제안된 기하모델링 연구주제들

발췌인 _ 이주행 ETRI 권터링기술연구팀 _ joohaeng@etri.re.kr

1. 서론

2007년 11월에 개최된 제10회 SIAM conference on Geometric Design and Computing에서 흥미로운 주제 발표가 있어서, 좀 늦은 감이 있지만 지면을 통해 일부 요약하여 소개하고자한다. 자세한 내용은 SIAG GD (SIAM Activity Group on Geometric Design) 홈페이지의 "Problem Section"에 게시되어 있다[1].

이 발표의 동기는 CAD/CAM/CAE 시스템을 직접 만들거나 (Siemens PLM Software, CoCreate) 이를 활용하는 산업체가 (The Boeing Company) 현장에서 당면한 문제 중 기하 모델링 관점에서 접근해서 해결해야 하는 것들을 학계에 제시하여 관심을 유도하고 이 방향으로 연구를 유도하는데 있다. 또한 의료 영상 정합이나 기구부(Moineau pump)의 설계에 관련되서도 새로운 기하학적인 접근이 필요한 부분이 제시되고 있다. 특히, Siemens사의 발표는 학계의 연구 방향과 산업체의 관심사가 차이나는 부분을 함께 설명하는 것이 흥미롭다.

전체 발표는 아래의 다섯 가지 주제들이며, 2절에서 지면관계상 1-3 주제들에 대해서 간략히 소개하기로 한다.

1. Geometric modeling problems in industrial CAD/CAM/CAE; George Allen (Chief Technologist & Technical Fellow, Siemens PLM Software, Shanghai)
2. Medical image registration; Solveig Bruvoll, Knut Mørken, and Eigil Samset (University of Oslo)
3. Surface modeling for composite materials; Thomas A. Grandine (The Boeing Company)
4. Spherical curves for the design of conical Moineau pumps; Jens Gravesen (Technical University of Denmark)
5. Surface feature redetection; Wolfgang Klemm (CoCreate Software GmbH)

2. 제시된 연구 주제

2.1 산업용 CAD/CAM/CAE에서의 기하모델링 문제

Siemens PLM Software의 George Allen은 기계 부품의 설계와 생산을 위해 CAD/CAM/CAE 시스템을 사용하는데 있어, 현장에서 발생하는 실제 문제들을 바탕으로 기하 모델링 관련 연구 주제들을 제시하였다.



먼저 비즈니스 측면에서 특정 기하 모델링 기법을 평가하는 기준을 설명하고, 현재 시장에서 통용되는 기술을 중심으로 배경 기술을 설명하고, 현장 사례를 바탕으로 세 가지의 관련 문제(filleting, 히스토리 기반 모델링, 성능)를 분석한다. 또한, 최근 연구 동향과 산업체의 요구사항의 격차를 설명한다.

비즈니스 현황

Siemens PLM Software는 PLM 전문 기업으로, 매년 약 10억불의 매출을 올리고 2억불 예산을 R&D에 투자하고 있다. 이런 수치는 동종의 업체와 유사한 규모이다.

대표 제품으로 NX 시스템은 오랜 시간을 걸쳐 수정되고 기능이 추가되어 현재 약 3천만 라인의 코드로 이루어져 있다. 따라서, NX의 소프트웨어 하부구조를 변경하는 것은 매우 이례적인 일로, 엄청난 성능 향상을 가져올 것으로 증명된 경우 뿐이다.

이러한 시스템을 사용하여 고객은 대부분 “더 싸게(cheaper, 비용절감)”, “더 빨리(sooner, 시간단축)”, “더 좋은(better, 품질향상)” 제품을 개발하고 싶어한다. 따라서, 이 세가지 가치는 비즈니스 관점에서는 소프트웨어 개발 프로젝트나 연구 주제의 중요성을 평가하는 기준이 될 수 있다.

배경 기술

다양한 CAD/CAM/CAE 소프트웨어에 채택되어 있는 파라솔리드 커널은 15년간의 개발 기간동안 그 하부구조는 거의 변화가 없었다. 아래는 이에 관련된 몇 가지 사실을 언급한다.

대부분의 상용 커널에서 지원되는 기하객체로는 이차 곡선/곡면, NURBS 곡선/곡면, 회전곡면, extrusion 곡면 등이 있다. 또한, 절차적 기하 객체(procedural geometry)로 오프셋 곡면, 구(球)기반 필렛 곡면(rolling ball fillet surface), 교차 곡면 등이 있다. 이 외의 새로운 기하 객체 타입을 지원하기 위해서는 매우 많은 비용이

든다. 예를 들어, 활발히 연구되고 있는 subdivision surface와 triangular surface는 대부분의 상용 CAD/CAM/CAE 시스템에서 아직 채택되고 있지 않다.

트리밍으로 연결된 두 곡면의 위상관계(topology)는 연결 부위(edge)의 특별한 자료 구조로 표현된다. 즉, 연결 부위를 대표하는 3차원 곡선과 각 곡면의 fin을 표현하는 두 곡선들이다. 특히, 이 세 곡선이 특정 지름의 튜브 내부에 모두 위치하게 되면, 연결 곡면을 유효하다고 판단할 수 있다. 그림 1 참조. (이러한 위

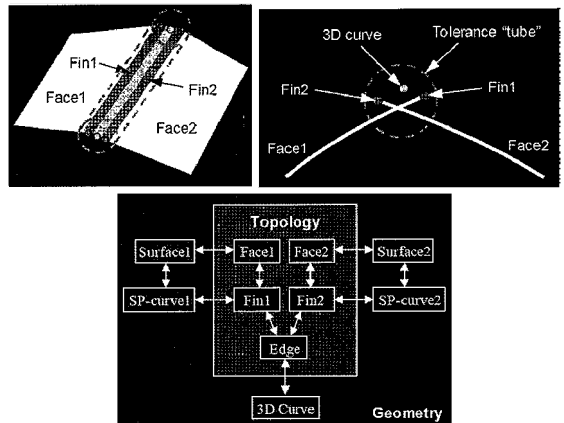


그림 1: 연결된 곡면의 위상관계를 표현하는 자료구조

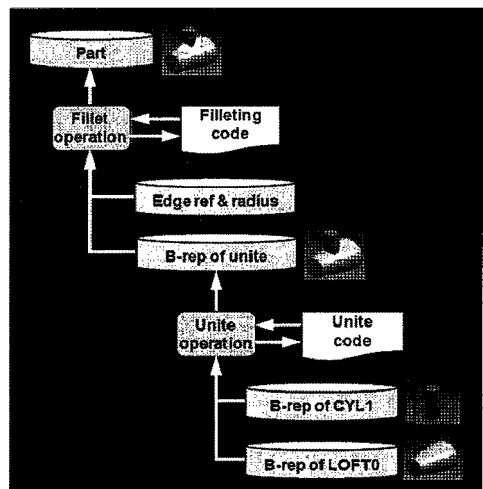


그림 2: 히스토리 기반 모델링의 예

상관계의 올바른 표현과 계산은 아래서 설명하는 필렛 곡면 생성과도 밀접한 관계가 있다.)

모델 생성을 위해 수행한 연산과 그 순서 등을 히스토리 트리(history tree) 형식으로 저장하는 것을 히스토리 기반 모델링이라고 하는데, 이 기법의 장점은 템플릿 모델을 생성하여 두고, 유사 모델 작성 및 기존 모델 수정을 용이하게 한다는 점이다. 그림 2 참조.

문제 1: 필렛 곡면 생성하기

필렛을 추가하는 작업은 모델의 해석과 가공을 위해서 필수적인 절차이다. 일반적으로 구기반 필렛이 개념적으로 단순하여 많이 사용되지만, 의외로 까다로운 경우가 많이 발생하여 모델링의 병목이 되며 경험 많은 작업자를 필요로 한다. 즉, 비용과 시간면에서 문제를 야기한다.

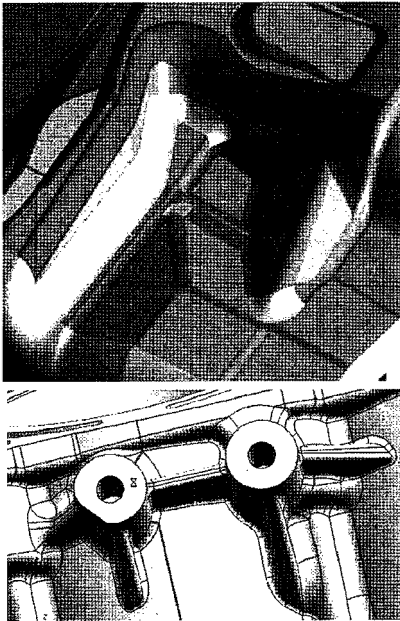


그림 3: 필렛 곡면의 예

아래에서는 몇 가지 예를 통해, 구기반 필렛팅 방식이 예측하기 어렵고 (unpredictable), 직관적이지 않음

며 (counter-intuitive), 오류가 발생하기 쉽다는 것을 (prone to failure) 보인다.

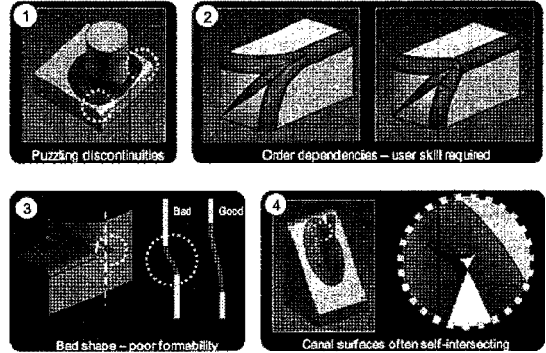


그림 4: 필렛팅에서 발생하는 문제들의 예

그림 4의 (1)에서 필렛 알고리즘은 올바르게 수행되었지만, 모서리 부분(점선의 원)에 불연속적인 경계선과 같은 바람직하지 못한 결과가 발생한 경우이다. (2)의 경우는 필렛 적용 순서에 따라 매우 다른 결과가 발생할 수 있다는 것을 보여준다. 따라서, 작업자의 경험이 중요하다는 것을 알 수 있다. (3)의 경우도 필렛 순서에 따라 차이가 발생하는 경우인데, 특히 편금 가공에서 formability의 문제가 발생하는 경우이다. (4)의 경우는 관상 곡면(管像, canal surface)에서 예상치 못한 자기교차가 발생하는 경우로, 또한 이를 제거하는 과정에서 주름(crease)이 발생할 수 있는 예를 보이고 있다.

이상의 예를 통해 구기반 필렛의 어려움을 극복할 수 있는 새로운 필렛 기법의 필요성을 제기하고 있다.

문제 2: 히스토리 기반 모델링

히스토리 기반 모델링의 일반적인 장점들로 다음을 들 수 있다.

- (1) 작업 프로세스에서 업스트림/다운스트림의 중첩 가능성이 높아지고 이를 통한 작업 효율 향상. (그림 5.)

- (2) 템플릿 모델의 모핑 및 재사용으로 인한 효율성 증대
- (3) 디자인 프로세스에 대한 지식 구축

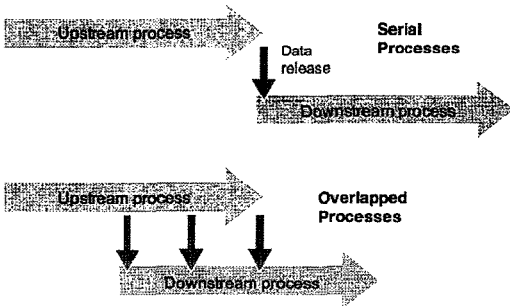


그림 5: 디자인 프로세스의 중첩

하지만, 히스토리 기반 모델링으로 정의된 템플릿 모델을 재사용할 때, 입력값 변경에 대해서 재생(replay) 오류가 발생하는 경우가 있다. 이 때는 소프트웨어 개발에서의 디버깅과 유사한 과정으로 오류를 찾아 내게 된다. 이를 위해 시스템적으로 디버깅 기능이 제공되면 좋겠지만, 현재 수준은 아주 원시적이다. 따라서, 재생 오류를 해결하지 못하고 템플릿 모델을 포기한 채 작업자가 처음부터 모델을 다시 만들게 되는 경우가 발생하곤 한다.

이 문제에 대해서 발표자가 제안하는 방법은 문학적 프로그래밍(literate program) 기법[2]의 적용이다. 이는 원래 전산학자 D. Knuth에 의해 제안된 기법으로 프로그램과 이를 설명하는 문서를 동시에 작성하고 관리하여 코드 자체의 가독성을 높이려는 목적을 갖고 있다. 실제로 이 기법을 이용하여 컴퓨터 그래픽스 분야의 소프트웨어와 교과서가 함께 제작된 사례가 있다[3]. 다른 예로는 그림 6과 같은 Mathematica 노트북을 들 수 있다. (문서, 절차, 수식, 예제를 모두 볼 수 있고, 주어진 예제는 일종의 템플릿으로 입력값 변경에 대해서 새로운 결과를 문서상에 보여줄 수 있다.) CAD/CAM/CAE 분야에서는 표준 프로세스를 기술한

디자인 핸드북에 코드와 예제가 내장되어 있는 경우라고 생각할 수 있다.

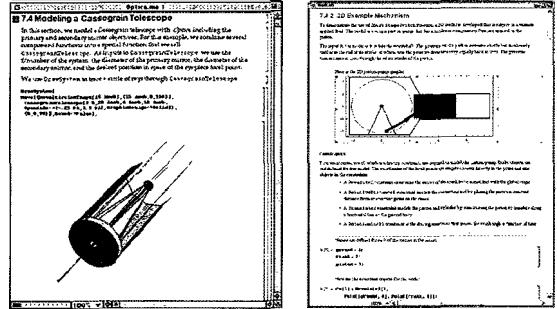


그림 6: Mathematica의 예

히스토리 기반 모델링에 대한 상기의 문제 해결을 위해서는 전산학과 사용자 인터페이스 분야 기술과 더불어 기하 모델링 분야의 역할이 중요하다. 예를 들어, 지금보다 좀 더 범용적이고 입력값의 변화에 덜 민감한 모델링 연산을 사용한다면, 오류의 발생이 줄어들 것이다.

이에 대한 또 다른 접근으로 히스토리에 기반하지 않은 새로운 모델링 기법의 도입이 활발하다. 예를 들어, Siemens의 Synchronous Technology, Autodesk의 Inventor Fusion, SpaceClaim 등이 있다. 이들은 히스토리에 기반하지 않은 직접 편집(direct manipulation)을 지원하는 특징이 있다.

문제 3: 성능

모델의 복잡도에 따라 다르지만, 히스토리 기반 모델링에서 입력 인수 수정에 따른 재생(replay) 시간은 보통 수분에서 수시간 까지 소요된다. 공구 경로의 생성 및 검증, 유한 요소 모델의 생성에도 많은 시간이 소요 되는데, 이러한 계산 시간의 지연은 작업자의 생산성을 저해하는 큰 요인이 된다.

현장의 모델은 그 크기가 큰 문제가 되는데, 자동차의 경우 보통 30,000개의 부품으로 구성되며 파일 사

이즈가 15~20 GByte에 이른다. (그림 7 참조) 다른 제조업의 사정도 비슷하다. 반면에, 기하 모델링 분야의 연구자들은 bunny나 Buddha와 같은 간단한 모델 [4]에 대한 실험 결과를 제시하는 경우가 많은데, 이는 매우 비현실적이며, 연구 자체를 잘못된 방향으로 이끌 수도 있다.

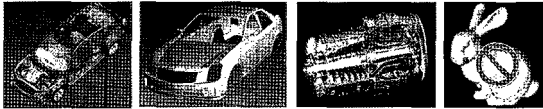


그림 7: 실제 사용되는 모델 vs. 연구용 모델.

또 다른 성능의 문제는, exploratory 연산(예를 들어, 단면 보기 등)에 대한 실시간 성능 요구사항이다. 이런 연산들은 실시간 성능으로 수행되지 못하면 의미가 없다.

이러한 성능의 문제를 해결하기 위해서는 현재 보다 100배 이상의 성능 향상을 요구하는데, 지금까지의 현재의 하부구조위에 작은 기능 개선들을 계속해서 이를 달성하지 못할 것이다.

이런 맥락에서 멀티코어 CPU와 GPU의 활용은 매우 중요하다. 하지만, 현재 커널에서 사용되는 기하 모델링 알고리즘과 자료구조는 병렬처리를 고려하지 않고 개발되었기 때문에 병렬화를 위해서는 하부구조의 대폭적인 변경이 필요하다. 또한, 기하 모델링 알고리즘은 분기문과 예외처리 등이 많아서 GPU 구현으로는 매우 어려울 수 있다.

성능 향상을 위해서는 기존과 전혀 다른 접근이 필요할 수도 있다. 어쩌면 매우 단순하면서도 범용적인 기하 객체만을 사용하는 것이 적당할 수도 있다. 예를 들어, 곡면을 모두 없애고, 폴리곤 모델만 쓰는 것이다. 이런 방식이 퇴보 같아 보일 수도 있지만, 이미 많은 알고리즘이 폴리곤에 기반하고 있다. (예를 들어, NC 가공) 하지만, 문제는 수백만 라인의 코드를 새로 짜야 하고 다른 시스템과의 호환성에도 문제가 생길

수 있다는 점이다. 따라서, 이런 접근이 근래에 채택되기는 어렵다.

제시된 문제의 요약

발표자는 이상에서 필렛, 히스토리 기반 모델링, 성능에서의 문제점과 시도해 볼 만한 해결책을 제시하였다. 또한, 비즈니스 측면에서 각 문제의 비용절감, 시간단축, 품질향상 상의 관계를 정리하였다. (표형식 요약은 [1] 참조) 특히, 히스토리 기반 모델링의 안정성(reliability)과 이해 가능성(understandability)를 향상시키는 것이 가장 중요하다고 제시한다.

최근 연구동향과 산업계 요구사항

발표자는 당시의 한 CAGD 관련 학술대회에 발표된 논문들을 분야별로 분류하였다. (분류 결과는 [1] 참조) 가장 많은 논문이 발표된 세 가지 분야는 기하 계산(곡면 교차, 근의 해, 곡면 트리밍 포함), 근사, 메시 생성으로, 전체 논문의 약 60%에 이른다. 하지만, 관련 기능들은 상용 CAD/CAM/CAE에 이미 구현되어 있고, 또 오랜 시간을 거치면서 기능과 성능이 향상되어 왔다.

메시 생성은 매우 흥미로운 분야이다. 제품의 성능 및 안전성 향상과 밀접한 관련이 있는 유한요소 해석에 관련되어 있기 때문에 더욱 그러하고, 그 외에도 렌더링, 간섭 해석, NC 경로 생성에도 필요하다.

주제가 subdivision, algebraic, implicit 곡면인 논문이 약 20% 정도로, 매우 비중있게 연구되고 있다고 볼 수 있다. subdivision 곡면은 애니메이션이나 게임에서 종종 사용되지만, 주류(主流)의 CAD/CAM/CAE 시스템에 채택된 경우는 없다. 이러한 새로운 곡면 기법들을 시스템에 구현해 넣는 것은 엄청난 비용을 필요로 하며 그 효율성을 정당화 하기도 쉽지 않다. 따라서, 발표자는 이 분야의 연구에는 관심이 없다고 언급한다.

점군(point cloud)에 대한 계산, 정합, 곡면 맞춤을



다루는 연구도 있다. 역공학 설계를 위한 측정기기의 발전으로 관심이 높아 지는 것은 사실이지만 아직 틈새 시장일 뿐이고, 점군을 꼭면 맞춤 하지 않고 직접 처리하는 것이 추세라고 언급하고 있다.

발표자는 특히, 병렬 및 GPU 기반 계산의 중요성을 강조하고 있다. 즉, 컴퓨터 하드웨어의 구조가 근본적으로 변화하고 있는 만큼, 기하 모델링에서도 이를 충분히 활용할 수 있는 기법을 개발하는 것이 매우 중요하다고 주장한다.

결론

Siemens사의 Allen이 [1]의 결론에서 언급한 것처럼, 어떤 연구가 꼭 실용적 응용이 있어야 하는 것은 아니지만, 대부분 CAGD 분야의 연구자들이 직간접적으로 본인의 연구가 현장에서 활용될 수 있기를 바란다고 생각할 때, 연구 주제의 적당한 평가 방법이 필요할 텐데, 이 때 “최종 사용자에게 비즈니스 측면에서 어떤 이득이 있는지”가 한가지 기준이 될 수 있다.

22 의료 영상 정합

의료영상 정합(medical image registration)은 의학적 응용의 중요성 때문에 이미 매우 활발한 연구가 진행 중인 분야이다. 하지만, Oslo대학의 Bruvold 등은 기하 모델링 분야의 전문가들이 이 분야에 새로운 방법론과 통찰력을 제시할 수 있다고 보고 있다.

대표적인 의료영상 획득 기법으로는 사진, 동영상, x-ray, 초음파, MRI, CT, PET 등이 있다. “영상 융합(image fusion)”은 이러한 상이한 이미징 기법으로 얻은 이미지들을 합성하는 기법으로, 합성된 이미지를 통해 개별 이미지는 얻을 수 없는 풍부한 정보를 제공하는 것을 목표로 한다. 예를 들어, 외과 수술에서는 상이한 이미징 기법들로 획득된 다수의 영상들을 실시간에 컴퓨터로 조합하여 의사에게 제공하고, 이를 통해 수술 부위의 절개를 최소화할 수 있게 한다.

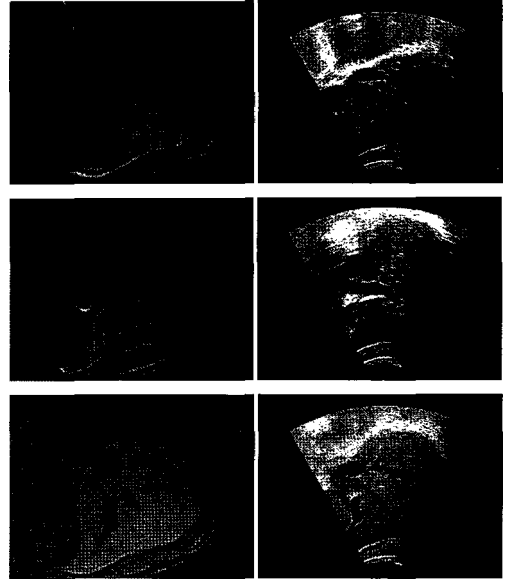


그림 8. 같은 인체 부위에 대한 2차원 CT 영상(좌측) 및 초음파 영상(우측)의 예. 각 이미지 간에 유사한 특징을 발견할 수 있지만, 정확히 일치하지는 않는다.

영상 융합의 전단계가 바로 영상 정합(image registration)이다. 3차원 레이저 스캐너로 얻은 점군(point cloud) 데이터를 정합하는 것은 영상 정합의 특수한 경우로, 주로 회전과 이동과 같은 강체 변환(rigid transformation)만을 이용하게 된다. 하지만, 일반적인 의료영상 정합은 이 보다 훨씬 복잡하여, 다음의 세 가지 특성을 고려해야 한다.

1. 서로 다른 영상 획득 기법은 물체의 상이한 특성을 측정한다. 예를 들어, 일반 2차원 사진은 반사 속성을 측정하지만, MRI는 수소 원자에 관련된 속성을 측정한다. 이렇게 상이한 기법으로 획득한 영상들을 정합하려면 대응하는 특징을 찾아야 하고, 영상의 차이를 정의하는 기준(metric)을 결정해야 하는데 이것이 쉽지 않다.
2. 서로 다른 영상들은 획득 시간에 차이가 있을 수 있고, 획득 당시 물체의 위치나 모양 자체에 변

화가 생겼을 수 있다. 중앙 제거 전후의 이미지를 정합해야 하는 경우가 좋은 예가 될 것이다. 따라서, 의료영상 정합은 매우 일반적인 변환(transformation)을 필요로 한다.

3. 의료영상이 외과수술에 사용되는 경우라면 최소한 초당 수 프레임 이상의 성능으로 영상이 생성되어 집도의에게 제공되어야 한다. 하지만, 현재의 컴퓨터 성능으로도 이러한 성능을 달성하기가 쉽지 않다.

위와 같은 의료영상 정합의 문제는 기본적으로 두 영상의 도메인 변환을 결정하는 함수와 이 변환에 의한 영상의 불일치(discrepancy)를 정의하는 것으로부터 출발한다. 비교적 간단한 점군의 정합에서는 강제 변환 함수와 유클리드 거리로 불일치를 정의하면 된다. 하지만, 일반적인 의료영상 정합에서는 spline이나 PDF와 같은 비선형적인 변환과 불일치를 정의하는 복잡한 metric이 필요하다. [1]의 발표자료에는 본격적인 의료영상 정합 문제를 다루고 있는 참고 문헌들을 소개하고 있으니 이 문제에 관심있는 독자들께서는 참조하기 바란다.

2.3 복합 재질을 위한 곡면 모델링

배경

일반적으로 민간 항공기는 주로 금속판을 연결하는 방식으로 제조되었으나, 보잉 787에서 최초로 동체의

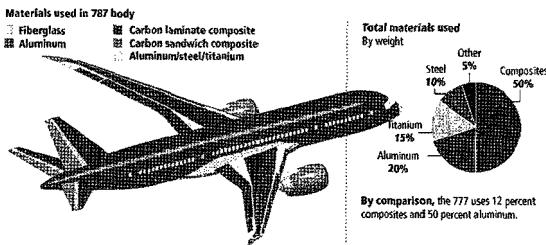


그림 9. 보잉 787에 사용된 재질의 종류와 복합재질이 사용된 표면적 및 무게의 비율이 가장 높다.

대부분을 복합재질의 적층방식으로 제조하였다. (그림 9 참조) 동체 크기의 증가와 유류비 인상 등의 경제성 등을 고려할 때 이러한 제조방식의 변화는 항공기 제조사 입장에서는 불가피한 선택으로 보인다. 또한, 항공사도 크게 환영하여 보잉 787의 예약구매 신청은 타사의 경쟁 기종을 크게 상회한다[5].

보잉사의 Grandline은 이러한 항공기 제작 방식의 변화에서 발생하는 새로운 설계 문제를 제시하였다. 제조 방식의 개념은 그림 10에 간략히 설명되어 있다.

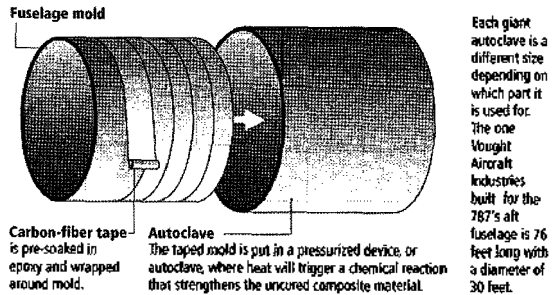


그림 10. 보잉 787의 동체제작 방법[5].

먼저 동체부 몰드위에 수지(樹脂, resin)가 배어 있는 탄소섬유 테이프를 기계를 이용하여 감게 된다. 이때 테이프는 그림 11에서처럼 여러 종류가 다층으로 입혀 지게 되는데, 층의 개수는 10~100층에 이른다. 이렇게 적층 과정이 끝나면 고압솥(autoclave)에서 경화(curing, baking) 과정을 거치게 된다. 즉, 탄소섬유에 스며있는 수지가 녹아 나오고 압력에 의해 고형화가 된다. 이 과정에서 열과 압력은 탄소섬유의 배치와 수지의 흐름에 영향을 주어, 외곽 표면은 경화전(硬化前, pre-cure)과 다른 형태를 갖게 된다.

또한, 적층 과정의 특성상 재료의 비등방성(anisotropy)이 존재하고 이는 적층재질 내부에 응력(stress)과 변형(strain)을 야기하며, 몰드에서 분리된 이후에 추가적인 변형이 발생한다. (이 현상을 composite springback 이라고 함.)

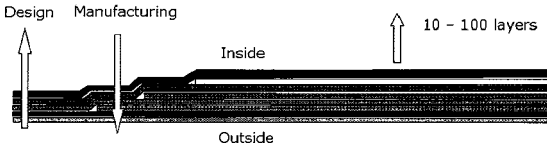


그림 11. 적층 방식 제작에서 디자인 및 제조 순서가 반대임을 보여주는 예.

문제 제시

적층재질로 이루어진 부품은 위치에 따라 두께가 다르다. (그림 11.) 경화전의 두께는 피라미드 모양(zig-zag)의 불연속적인 함수로 정의된다. 경화과정에서 수지가 녹아 흐르며 경화전 재질층이 갖는 불연속성을 매워지게 된다. 이 때 수지의 흐름을 결정하는 요소는 매우 다양한데, 고압솔 내부의 온도 및 압력, 부품의 형상, 재질층의 개수 및 분포, 경화 과정의 습도, 재질층 섬유질의 방향 등을 들 수 있다. 또한, 고압솔의 압력에 의해서 재질층의 두께 자체가 경화전에 비해 줄어들 수도 있다.

기존에는 복합재질을 적용할 때 동체의 최외각 표면을 tooling surface로 정의하고 동체 내부로 적층을 해 나갔지만 (outer surface tooling), 787기의 경우에는 이 방식을 적용할 때 거대한 고압솔을 필요로 하는 등 현실적인 문제가 발생한다. 따라서, 787기 제작에서는 동체 내부에서 외부로 적층을 해나가는 기법(inner surface tooling)을 채택하게 된다.

즉, 주어진 설계 문제는, 경화전 재질층의 분포, 적층 구조, 방위 등이 주어졌을 때, 수지의 흐름과 고압솔의 압력을 고려하여 경화후(硬化後, post-cure) 최종 표면의 형상을 계산하는 것이다.

또한, 추가적인 문제로 다음의 두 가지를 제시하고

있다:

- (1) 경화후 최종표면의 형상, 개별층(ply)의 적층 구조, 재질의 외곽 형태(boundary)가 주어졌을 때, tool surface의 형상을 역으로 추정하는 문제
- (2) 강화섬유의 내부 응력에 의해 경화후 tool surface를 제거하면 형상이 찌그러짐이 발생할 수 있다. 따라서, 경화 과정, 수지의 흐름, 찌그러짐까지 고려하여 tool surface를 설계하는 문제

3. 맺음말

이상에서 SIAG GD을 통해 제시된 산업체/타분야 관점에서의 기하 모델링 연구주제를 일부 살펴 보았다. 제시된 주제들은 발표자의 개인 견해, 특정 업체의 관점, 시간이 좀 지난 (3년이 조금 넘음) 기사라는 한계를 갖고 있지만, 매우 진지하고 아직도 유효한 주제들임에 틀림없다.

산업계의 현장 요구와 학계의 연구 주제가 반드시 일치할 필요는 없겠지만, 다행히 공통의 관심사를 찾게 되는 경우에는 많은 시너지를 예상할 수 있다. 따라서, 국내 학회에서도 추진해 볼 만한 만한 모범적인 사례가 아닌가 생각된다.



참고문헌

1. SIAM Activity Group on Geometric Design: Problem Section <http://www.ifi.uio.no/siag/problems/>
2. Literate Programming http://en.wikipedia.org/wiki/Literate_programming
3. PBRT <http://www.pbrt.org/>
4. The Stanford 3D Scanning Repository <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>
5. Dreamliner 101: All about the Boeing 787 <http://www.seattlepi.com/boeing/787/787primer.asp>