

복합재 구조물의 동시공학 설계최적화

Concurrent Engineering Design Optimization of Composite Structures

김 전 인*, 이 회 각*
* 육군사관학교 무기공학과

Abstract

Concepts, methods and tools for interactive CAD-based concurrent engineering design optimization of mechanical/structural systems and components which are critical in terms of cost, development time, functionality and quality, are presented. The emphasis is on implementation of methods and capabilities for the optimization of composite structural system, and the integration of design process and manufacturing process of composite structures into standard CAD-based concurrent engineering environment. The optimization of composite fuselage structures are performed under concurrent engineering environment for the example.

Keywords : concurrent engineering / design sensitivity analysis / computer aided design (CAD) / optimal design / sizing design / composite structures / interactive design

1. 서 론

동시공학 (Concurrent Engineering ; CE) 설계과정은 시스템을 설계하는데 있어, 제작비용 및 운용비용의 절감과 설계기간의 단축을 위하여 설계 및 생산과정 및 최적화 알고리듬을 포함하는 효율적인 설계 절차로 알려져 있다. 동시공학을 적용하기 위하여는 설계, 생산, 비용에 관한 많은 정보와 최적화 설계를 실시할 수 있는 적절한 프로그램의 구성 및 설계를 검증할 수 있는 시험시설은 물론 이러한 팀들이 상호 협력하여, 설계를 실시할 수 있는 환경이 필요하다. 동시공학에 대한 적용은 80년대 후반부터 본격화되기 시작하였다. [1] 동시공학은 제품을 생산함에 있어 초기설계단계부터 사용자의 요구사항, 품질, 비용, 수리, 생산방법, 설계방법은 물론 폐기까지를 고려하여 체계적으로 제품의 설계 및 생산과정을 결정하는 새로운 방법론이다. 따라서 동시공학이라함은 설계와 생산과정, 그에 따르는 작업도구, 수리도구와 과정 등을 제품의 품질향상과 비용절감을 위하여 동시에 고려하는 것을 의미한다. 동시공학을 수행하기 위한 S/W는 최적설계용, 해석용, 비용결정용, 제작방법 및 재질 선정용, 전/후처리용 프로그램들이 필요하다. 이들중에서 가장 중요한 역할을 수행하는 최적설계용 프로그램에 대하여는 다음절에서 자세히 다루도록 한다.

구조물 설계최적화 연구분야는 그간 꾸준한 발전을 해 왔으며[2,3], 특히 지난 10여년동안 동시공학을 이용한 설계방법의 개발과 응용을 우주항공구조물에 적용하고 있으며, 그리고 이를 효율적으로 다룰수 있는 고성능 컴퓨터의 등장으로 이 분야의 관심은 그 어느 때보다 더욱 고조되고 있다. 이것은 실제 응용위주의 최적화시스템 개발의 가능성을 높였다 [4,5].

본 연구에서는 복합재구조물의 설계최적화를 위하여 구조물 설계최적화의 기본개념과 방법을 소개하고, 동시공학 설계를 위하여 필요한 환경과 모델들을 설명하고, 이 시스템에 기초한 예로서 항공기 동체용 복합재 구조물의 최적설계 문제를 다루도록 한다.

2. 최적화 방법

2. 1 기본 개념

구조물 설계최적화 문제는 일련의 형상 및 거동 구속조건을 만족시키는 가운데 목적(기준, 비용)함수라 불리우는 특정 함수를 최소화(또는 최대화)시키는 최적의 설계변수값들을 구하는 것이다. 스칼라 최적화문제(SO-Problem)는 일반적으로 다음과 같이 정의된다.

Def. 1 : Continuous, deterministic SO-problem

$$\begin{aligned} \text{Min } & \{ f(x) \mid h(x) = 0 : g(x) \leq 0 \} \\ x \in & R^n \end{aligned}$$

여기서 f 는 목적함수, $x \in R^n$ 은 설계변수, h 는 등구속조건, g 는 부등구속조건을 나타낸다. 목적함수나 구속조건은 설계변수의 비선형함수일 수 있으며 또한 음함수일 수도 있다.

다목적 최적화문제 (MCO-Problem)에 대해서는 주어진 방식대로 다목적을 고려하는 적절한 해를 구하기가 쉽지 않다[6].
Def. 2 : Continuous, deterministic MCO-problem

목적함수 $f(x)$ 를 제외하고 모든 기호는 식(1)에서와 같다. 통상적인 목적함수의 가중치 외에, 다음과 같이 문제마다 다른 목표들이 있을 수 있다[6]. 즉,

- $f_1(x)$: 비용 (제작, 재료, 조립 등)
- $f_2(x)$: 구조적 요구사항 (변형, 응력, 안정성, 고유진동수, 동력학적응답, 공탄성 효율 등)
- $f_3(x)$: 표면정확도 (광학, 천문학, 재료공정 등)
- $f_4(x)$: 품질손실함수 (환경조건, 결함 등)

2.2 최적화 모델링

Fig. 1은 최적화 모델을 보여주는 것으로 각 단일 모듈들에 관하여 살펴본다.

최초설계(Initial Design)

가능한 최상의 최초설계를 구하기 위하여 일반적인 설계결정이나 구성품의 위상을 최적화과정에 부합시키도록 새로운 개념을 소개한다. 따라서 공식적인 구조물 최적화 방법은 계획단계에서 이미 적용되어 있어야 한다. 위상을 구하는 도구인 균질화법[7]과 같은 새로운 방법이 진행과정상 여러 곳에서 사용된다. 이 방법은 영상처리기법과 기하학적 모델링 기법을 통하여 균질화법을 다양한 구조물 최적화 절차에 연결시킨다.

설계모델(Design Model)

설계모델 작업은 유일한 대응법칙을 사용함으로써 설계변수 x 로부터 구조해석변수 y 를 계산하는 것이다:

$$y = f(x), x \in R, y \in R \quad (2)$$

해석변수는 물리적인 거동을 나타내는 데 필요한 구조물 파라메터의 일부로서 구조물 최적화 문제에서 해석변수는 보통 치수를 나타내는 양(예를 들면 두께, 단면, 관성모멘트 등), 기하학적 치수, 형상 파라메타나 재료의 양들이다. 특히 유한 요소 구조해석법을 사용할 때, 절점 위상과 더불어 모든 구조요소들이 설계모델에 의해 결정된다. 설계모델링의 일부는 선형으로 다루어질 수도 있다. 즉,

$$y(x) = Ax + y_0 \quad (3)$$

평가모델(Evaluation Model)

구조물 시스템의 상태변수 r 은 변위, 응력, 합력, 변형률, 고유치등과 같은 양을 가르킨다. 이를 상태변수는 구조물의 모델을 통한 설계변수에 좌우된다. 평가모델의 작업은 이를 상태변수의 함수로서 목적함수 벡터 f 와 구속조건 g 를 수식화 하는 것이다.

구조물 최적화의 대부분은 구조물의 중량을 최소화하는 문제이지만 경우에 따라서는 고도로 정밀한 시스템의 변형최소화나 응력집중 감소를 위한 응력최소화 또는 구조물의 특성 고유치의 최대화등과 같이 다른 목적함수를 가질 수도 있다. 이러한 이유로 서로 다른 형태의 구속조건이 목적함수로 사용될 수 있으며, 이 때 목적함수의 비선형으로 인해 그들은 구조물의 중량보다는 다른 기가 더욱 어려워진다.

설계민감도해석(Design Sensitivity Analysis)

목적함수와 구속조건의 미분항은 설계변수에 대한 민감도해석에 의해 결정된다. 이를 미분항은 1차 및 고차의 최적화 알고리즘에서 필요로 한다. 상태변수 $r \in R^n$ 을 도입하면, 목적함수와 구속조건은 다음과 같이 쓰여진다.

$$f = f(r, x) \text{ resp. } g = g(r, x) \text{ with } r = r(x) = r[y(x), \hat{y}] \quad (4)$$

전미분하면

$$df(r, x) = \frac{\partial f}{\partial r} dr + \frac{\partial f}{\partial x} dx \quad \text{with} \quad \frac{\partial f}{\partial r} = \left[\frac{\partial f_i}{\partial r_j} \right]_{m \times n} \quad (5)$$

dr 을 제거하면 i 번째 줄이 $\frac{\partial f}{\partial x}$ 에 해당하는 민감도 행렬 A_i 를 구할 수 있다.

$$df = A_i dx \quad (6)$$

부가적으로 설계민감도 정보는 구조물 거동에 대한 통찰력을 증대시키고, 자연스런 설계변수의 선택으로 설계모델을 가능한 작게 하고, 최적화되지 않은 파라메타와 관련된 최적화 문제의 민감도, 분할 가능성의 시험 등을 위하여 필요하다. 미분항은 보통 유한 차분법에 의한 수치해법, 해석법 (직접미분법, 보조변수법), 준해석법[8]같은 방법으로 계산한다. 선형구조물 뿐만 아니라 비선형구조물에 대한 설계민감도 해석도 가능케 되었다.[9,10]. 치수설계변수를 사용한 이 연속체 설계 민감도해석법은 대변형, 대회전, 소변형 및 비선형 탄성재료성질 등에 대해서도 잘 적용될 수 있으며 나아가 형상설계 시에도 확대적용 할 수 있게 되었다.

2.3 최적화 전략

다목적 최적화(Multi-criteria Optimization)

비선형 다목적 최적화 문제의 해는 상이한 방법으로 구할 수 있다. 그중 하나는 스칼라 최적화 문제에 대입하여 변형시키는 것으로 완전해 X^* 중에서 협상해 \hat{x} 를 구하는 것이다.

Def. 3: Substitute Problem

$$\min_{x \in X} p[f(x)] \quad (7)$$

다음과 같은 특성을 갖는 $\hat{x} \in X^*$ 가 존재하면 이것을 벡터 최적화문제에 관한 대입문제로 부른다.

$$p[f(\hat{x})] = \min_{x \in X} p[f(x)] \quad (8)$$

함수 p 는 선호함수(preference function) 또는 대입목적함수 또는 품질기준(quality criterion)으로 불리워진다. 현재, 벡터 최적화문제를 대입문제로 변형시키는 데는 여러 규칙이 있다. 최적화과정의 범위내에서 그들은 “전략”에 속하는 것으로 다음과 같은 목적함수 가중치법(method of objective weighting)이 그중 하나가 될 수 있다[6].

$$p_w = \sum_j w_j \frac{f_j(x)}{f_0}, \quad f_0 = f_0(x_0), \quad \sum_j w_j = 1, \quad w_j \geq 0 \quad (9)$$

비선형 다목적 최적화 문제는 근복적으로 상당히 복잡한 설계영역을 가지게 됨으로 인하여, 최근에는 전체 최적화 방법(global optimization method)이 많이 쓰여지고 있다. 아직은 설계모델이나 평가모델의 응답을 구하는데, 컴퓨터의 계산시간이 많이 걸리므로 전체최적화 방법이 일반화 되지는 못하였지만, 컴퓨터의 용량이 늘어남에 따라 일반화될 전망이다. 전체최적화 방법으로는 pure random search method, Bayesian search method, simulated annealing method, Improving Hit-and-Run method, Hide and Seek method 등이 있다.

형상 최적화(Shape Optimization)

형상최적화문제는 구조물을 비롯하여 기계, 전기, 유체유동, 냉난방, 음향학등 다방면에 걸쳐 다루어져 왔다. 형상최적화문제와 치수(size)최적화 문제의 근본적인 차이는 후자는 영역이 고정된 상태에서 형상을 나타내는 단면적이나 두께등이 설계변수로 정의되는 데 비해 전자는 Fig. 2와 같이 영역을 기술하는 함수가 설계변수가 된다. 즉, 형상최적화문제에서 1~3차원 구조물의 형상은 지배방정식과 구속조건 등의 함수가 정의되는 영역으로, 최적화과정에서 이를 영역이 변화되며 따라서 최적의 영역을 구하는 것이 궁극적인 목표이다. 이 분야에 관한 연구는 치수최적화에 비해 활발치 못한데 그 이유는 복잡한 수학적 이론을 바탕으로 한 설계민감도 해석이 난해하고 경계면이나 인접면에서 민감도 수치해의 정확도가 떨어지므로 최적화가 어려워지며 이것을 개선하기 위하여 유한요소의 수나 설계변수의 수를 늘려야 하는등 최적화문제가 대형화되기 때문이다.

위상최적화(Topology Optimization)

오늘날 S/W시스템은 최근 개발된 방법에 의해 구조물의 최적위상을 구할 수 있는 능력을 갖추게 되었다[8]. 여기서 구조물은 고밀도 재료의 공간영역으로 간주된다. 위상최적화는 기본적으로 유한차원의 최적화 중의 하나로서 Fig.3과 같이 구멍이 있는 미세조직의 물리적인 모델링에 기초하여 강성성분과 밀도사이의 관계식을 도입함으로써 해결될 수 있다. 여기서 미세조직의 방향과 밀도는 허용설계영역에서 연속변수로 기술된다. 이 문제의 해는 허용영역의 유한요소 분할에 기초하여 설계변수(미세조직의 밀도와 방향)의 최적치는 최적화조건법을 통하여 반복적으로 구해진다. 좀 더 정확히 말하자면, 위상최적화를 위하여 주어진 재료체적에 대해 유연도를 최소화하는 것으로 재료밀도를 설계변수로 사용한다.

3. 구조물 설계최적화를 위한 동시공학 시스템

3.1 기본개념 및 설계단계

지난 수년간에 걸쳐 계산능력과 그래픽 성능이 월등히 좋아진 강력한 W·S이 등장함으로써 구조물 설계최적화를 위한 동시공학 시스템 CESSO(Concurrent Engineering System for Structural Optimization) 구축이 가능해 되었으며 구조물의 구조해석, 민감도해석 및 최적화를 위해 W·S의 상호대화능력이 뛰어난 메뉴식 멀티 윈도우 시스템을 구사한다.

CESSO는 설계자로 하여금 기하학적 모델을 생성하고, 사용가능한 해석방법을 결정하여, 설계의 성능특성을 결정하여 최적설계를 수행하도록 한다. 필요시 해석모델들은 매우 간단한 형태로부터 유한요소법에 이르기까지 광범위한 방법들이 사용될 수 있다. 유한요소법이 사용된다면, 유한요소 모델을 구축하며, 기하학적 모델을 파라메트리화하고, 유한요소해석

을 수행 하며, 유한요소해석 결과를 영상화하고, 성능치를 특성화하여 설계민감도해석과 최적화를 수행하게 함으로서 설계 과정을 통합한다. CESSO의 중요한 설계단계로 취급되는 설계파라메타화는 설계, 해석 및 제작팀들이 초기단계에서 상호 이해와 협조를 하게 함으로써 통일된 설계변수群이 각 과정에서 공통으로 사용되게 한다. 설계파라메타화의 결과로 CAD, CAE 및 CAM 과정이 동시공학 설계환경을 구축하도록 한다. 여기서는 CAD와 CAE가 통합되도록 한다. 설계 3단계인 전처리(pre-processing), 설계민감도계산(design sensitivity computation) 및 후처리(post-processing)가 구조물의 치수 설계를 위하여 CESSO에 적용된다.

3.2 전처리 설계단계

전처리 설계단계를 지원하기 위해 CESSO에서 사용되는 방법은 기존의 정보들을 데이터 베이스화 함으로써 설계단계를 간략화함은 물론 제작비용을 감소시킬 수 있다는 것이다. 가장 대표적인 전처리 단계용 복합재 설계용 프로그램으로써는 NASA에 의하여 개발된 COINS(COmposites INformation System database)이다. 이것은 자동정보 추출도구(ADAF : Automated Data Abstraction Form)를 개발하기 위하여 생성된 데이터베이스로써 IBM, Macintosh, UNIX 환경하에서 운용할 수 있다. Fig. 4에서는 ADAF의 개략적인 구성도를 보여주고 있다.

기하학적모델

구조물의 기하학적 모델을 결정하기 위하여는 새로운 개념의 모델을 PATRAN 등을 이용하여 생성할 수도 있지만, 기존의 형상들로부터 적합한 형상을 주어진 설계조건과 제작조건, 그리고 재질 등의 비용 등을 고려하여 선택할 수도 있다. 보강된 구조물의 형상을 결정하기 위하여 여러가지 형상들로부터 적합한 형상을 결정하였다. 이러한 형상 결정과정은 다음에 자세히 설명하고 있다.

설계모델

설계 파라메타화는 구조물 설계과정에서 가장 중요한 단계중의 하나로서 주 기능은 기하학적 모델을 특징짓는 기하학적 파라메터를 정의하는 것이다. 하지만 동시공학 환경하에서 설계 파라메터는 기하학적 설계변수 이외에도, 재질, 제작공정, 제작공구의 선택, 설계군, 적용 대상, 품질관리 정도, 비용등 여러 가지 형태로 존재할 수 있으며, 이들을 설계변수로 선택할 수 있는 최적설계 알고리즘이 필요하다.

CESSO의 사용자 인터페이스 메뉴에 의하여 제공된 설계모델 또는 전처리용 프로그램에 의하여 생성된 기하학적 모델과 같은 설계 파라메터를 상호작용 시킴으로써, 사용자는 구조물 시스템의 모든 설계구성품에 대해 설계파라메타화를 수행할 수 있다. CESSO는 사용자 입력치부터 설계파라메타를 읽어 구조물에 대한 설계계획서를 생성한다. 이어서 설계계획서에 의해 후처리 단계에서 해석모델 생성, 설계민감도 계산 및 설계개선을 위해 CESSO 데이터 베이스에 입력된다.

해석모델

해석모델의 유형은 폐형해(Closed Form Solution)등과 같이 간단한 형태의 해석모델로부터, 3차원 유한요소 해석법과 같이 상당히 복잡한 형태의 해석모델까지 다양한 형태로 존재하고, 동시공학 시스템에서는 모든 종류의 해석모델을 사용할 수 있도록 유연성을 보유하여야 한다. 초기설계 단계부터 복잡하고, 계산시간이 많이 소모되는 해석모델을 고집하고 사용할 경우에는 최적설계를 수행하는데 수퍼컴퓨터를 동원하고도, 6개월이상의 계산시간을 필요로하는 문제들은 얼마든지 있다. 예를 들면 대형구조물설계 또는 과좌굴문제들과 같이 중분을 취하면서 해를 구하는 경우이다. 따라서 설계단계에 따라 적절한 해석모델이 제공되어야 하고, FEM과 같은 복잡한 모델보다는 계산시간이 적게들고 해가 비교적 정확한 해석해가 선호되지만, 최근들어 이러한 연구결과는 별로 많지 않은 추세이다. 이러한 이유로 간단한 해석해가 동시공학 환경에 적합하다. 하지만 주의해야 할 것은 해석모델의 정확성이 결여되는 경우, 최종 설계결과는 신뢰성을 상실하게 된다는 것을 유의해야 한다.

상용 FEM Code를 해석모델로 사용할 경우에는 설계모델은 UPGEO 모듈과 UPFEM 모듈을 사용하여 해석모델로 바뀌게 된다. UPGEO 모듈은 상용 해석 코우드의 유한요소 형태를 CESSO 요소형태로 맞추고 요소의 절점 기하학적 성질을 계산하며, 설계민감도해석을 위해 요소의 Gauss점에서 기하학적 성질을 계산한다. 기하학적 성질은 설계파라메타화와 일치하도록 계산되어진다. 이어서 UPFEM 모듈은 유한요소해석을 수행하기 위하여 UPGEO에 계산된 절점 기하학적 성질을 사용하여 유한요소 입력 데이터 파일을 새로운 것으로 바꾼다. UPFEM 모듈은 ANSYS, MSC/NASTRAN 및 ABAQUS에 대한 해석모델개선을 지원한다. UPGEO, UPFEM 및 유한요소 인터페이스(FEINT)는 CESSO가 쉽게 기존 유한요소 코우드들을 활용할 수 있도록 한다.

유한요소해석 결과를 영상화하기 위하여 ANSYS에 대해서는 ANSPAT[11]를, MSC/NASTRAN에 대해서는 NASPAT[12]를, ABAQUS에 대해서는 ABAPAT[13] 등을 PATRAN에 있는 결과해석기가 CESSO에 이용되어진다. PATRAN에서의 해석결과의 영상화는 설계자가 성능치를 정의하는 것을 돋는다.

성능치의 정의

성능치의 정의는 설계모델에 의하여 결정되어지며, 앞에서도 언급되었듯이 복합재 구조물의 질량, 강성, 변위, 좌굴응

력 등의 기계적 성능 뿐만 아니라, 최소의 비용을 발생시키는 재질, 형상, 제작과정, 제작도구들의 선택 등으로도 정의될 수 있다. 최근들어 이러한 경향으로 인하여 최적의 재질을 선택하는 프로그램이 등장되기도 한다.

성능치는 유한요소 응답을 사용하여 정의될 수 있다. 7개의 서로다른 형태의 성능치가 CESSO에 의해 정의되며 이들은 질량, 체적, 변위, 응력, 유연도, 좌굴, 및 진동수 등이다. 구조물 성능치의 일부가 설계민감도의 영상 전개를 위해 선정될 수 있고 설계민감도 계산후 what-if 연구가 수행된다. 또한, 목적함수 및 구속조건은 trade-off 결정을 위한 상호대화식 설계최적화를 위해 적절한 구속조건 한계치와 더불어 특정 성능치를 결합함으로써 정의될 수 있다. CESSO의 사용자 인터페이스 메뉴는 성능치와 목적함수 및 구속조건 함수가 쉽고 편리하게 정의되게 한다.

3. 3 설계민감도 계산

설계민감도 계산이 필요한 경우에는 설계민감도 해석을 실시한다. 설계민감도 계산은 유한요소 후처리 데이터만을 사용하여 유한요소해석 코우드의 밖에서 수행되어지므로 ANSYS, MSC/NASTRAN, 및 ABAQUS와 같은 다양한 유한요소 코우드가 유한요소해석 코우드를 수정하지 않고서도 CESSO에서 설계민감도 계산을 위해 활용되어질 수 있다.

하지만 본 연구에서 사용되어진 최적화 알고리즘은 전체 최적화 기법이므로 미분항이 필요치 않으므로, 미분항을 계산하지 않았고, 설계민감도 해석을 실시하지 않았다.

3. 4 후처리 설계단계

후처리 설계단계는 설계를 개선하기 위하여 여러 가지 대안들을 상호 비교함으로 나온 설계값을 얻어 내려는 과정이다. 또한 설계자 편의를 위하여 설계값들을 그림이나, 그래프를 이용하여 제공하는 것도 포함한다. 후처리 설계단계의 주요목표는 4단계 설계과정을 통하여 설계를 개선하기 위하여 설계민감도 정보를 이용하는 것이다. 여기서 4단계 설계과정은 설계민감도의 영상처리, what-if 분석, trade-off 결정, 및 상호대화식 설계최적화이다. Fig. 5는 후처리 단계를 지원하기 위하여 CESSO에서 사용된 4단계 상호대화식 설계과정을 보여준다.

첫 세 설계단계는 설계자로 하여금 현재 설계에서 구조물 거동을 이해함으로써 보다 나은 설계값을 구하도록 한다. 마지막 설계단계는 설계최적화를 수행하기 위하여 상용 최적화 코우드를 적용한다. 설계문제에 따라, 설계자는 각 반복설계에서 설계를 개선하기 위하여 4단계의 일부 또는 전부를 사용할 것이다. 즉, 새로운 설계는 what-if, trade-off, 또는 interactive 최적화 설계단계로부터 얻어질 수 있다. 일단 새로운 설계가 구해지면, UPFEM 모듈이 새로운 설계를 위해 절점에서 기하학적 형상을 계산하기 위하여 실행될 것이며, UPFEM이 해석을 위하여 해석모듈을 새롭게 할 것이다. 유한요소해석 결과가 구해진 후, 설계민감도 계산은 새로운 설계의 능동적인 구속조건에 대해서만 수행될 수 있다.

최적화 알고리즘을 사용하여 최적설계가 얻어질 때, 설계자는 제작허용오차를 정의함에 있어 도움이 되는 민감한 설계 변수를 규명하기 위하여 다시 설계민감도를 나타내 보이거나 what-if 분석을 반복하게 한다.

4. 복합재 구조물의 동시공학 적용 예

복합재 구조물은 경량화, 고강도화를 이루기 위하여 여러분야에 적용되고 있다. 경량이 필수적인 항공우주 구조물로부터 시작되어, 부식이 중요한 문제인 선박구조물, 자동차를 비롯한 각종 기동장비는 물론, 최근에는 교량을 비롯한 각종 건축물 등에 까지 널리 적용되고 있다. 하지만 복합재료의 설계는 단순히 금속재료를 복합재료로 바꾸는 작업만은 아니며, 가장 기본적인 물성치 값을 포함한 모든 설계과정 및 파손이론이 정확히 규명되지 않은 분야이다. 따라서 복합재 구조물의 설계는 매우 복잡하며, 잘못 설계할 경우 제작비용이 과다함은 물론, 복합재의 특성을 충분히 살리지 못하는 설계가 되기 쉽다. 본 연구에서는 복합재를 이용하여 항공기 동체(fuselage)를 설계함에 있어 동시공학이 어떻게 적용되어, 어떠한 결과를 얻게 되었는가를 살펴보았다. 목적함수로는 제작비용과 중량이 선정되었고, 설계의 제약조건으로는 각종 기계적 성질은 물론, 제작 방법, 재질, 제품의 수리 보수 특성도 고려되었다.

설계 및 제작과정 선정

Fig. 6에서는 최적설계의 과정과 전략을 보여주고 있다. 설계와 제작과정은 비용을 결정하는 중요한 요소이므로 설계팀(Design-Built Team)은 동시공학을 적용하여야만 하였다. 상세비용 해석과 상세설계 해석을 입증하기 위하여 실험이 수행되었다. 설계를 결정짓는 요소들은 표1에 수록하였는데, 이러한 요소들은 어느 한 가지에 의하여 전체 설계가 영향을 받기보다는 서로 독립적인 요소들이 상호작용에 의하여 전체 설계를 결정짓는 요소들이 되었다. 따라서 전체 설계 문제는 간단하지 않았으며, 최적설계는 각 요소들 사이의 최적관계가 결정될 때 이루어질 수 있었다.

최적의 재질, 적층 과정, 부품의 형상 등의 최적관계를 선정하여 최소의 비용과 중량의 효과적인 설계가 결정되었다. Fig.7은 여러 가지 설계군에 대하여 최적설계를 수행한 결과를 보여주고 있다. 밝은 점들은 알루미늄 재질을 복합재로 바꿀 경우의 결과를 보여주고 있는데, 중량은 감소하지만 비용이 더 드는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 비용에 대하여 제작과정을 최적설계한 결과는 상당히 좋은 결과를 보여주고 있다. 각 부품에 대한 제작방법에 대한 결과는 표2에서 보여주고 있다.

Table 1 Process and Assembly Parameters

Minimize	Maximize
Material Cost/Scrap	Tolerance Control
Part Complexity	Part Commonality
Part Count	Automation
Tooling	Tooling Simplicity
Shimming	Material Performance
Touch Labor	Quality-Process Control
Inspection	Lay-up/Forming Efficiency
Repair	Assembly Accessibility
Maintenance	

Table 2. Optimum Results for Manufacturing Process and Assembly Plans

	Alternatives	Optimum Results
Frames	Compression Molding	RTM/Textile
	RTM/Textile	
	Pultrusion	
	Stretch Forming	
Stringers	Drape Formed	Drape Formed Constant Gage, Cocured
	Pultrusion	
	Constant/non Constant Gage	
	Precured, Cocured	
Skins	Tow Placement	Tow Placement
	CTLM	
Element Attachments	Cocure	Cocure
	Co-bond	
	Fastened	

최적 치수 설계

제작과정에서 선정된 판과 모자모양의 보강재가 결합된 보강판의 치수에 관한 최적설계가 수행되었다. 최적설계 알고리듬으로는 IHR(Improved Hit-and-Run)방법이 사용되었다. IHR은 무작위 탐색법에 기초한 global optimization method이며, 최적설계 기법에 대한 원리를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 먼저 원점으로부터 구형상에서 무작위로 선정된 점에서 원점보다 향상된 점을 선정하고, 원점과 향상된 점을 연장하여 경계선까지 확장하여, 그 선위에서 무작위로 추출된 점들 중에서 향상된 점을 결정하여 다시 원점으로 사용하는 과정을 반복하여 최적점을 도출하는 방법이다. 목적함수는 중량, 설계변수는 판과 보강재의 적층각과 두께, 보강재사이의 간격을 선정하였다. 구속조건으로는 최대 변형을 이론과, 각 부재에서 최소 강도(170 GPa)를 갖도록 하였다. 재질은 AS4/3501-6 Graphite/Epoxy를 사용하였고, 물성치는 표3에 수록되었고, 주어진 하중조건은 표4에 수록되었다.

Table 3. Material Properties for AS4/3501-6

E_1	132.5 GPa	ϵ_1^{allow}	0.0143
E_2	9.4 GPa	ϵ_2^{allow}	0.006
G_{12}	4.9 GPa	γ_{12}^{allow}	0.01
ν_{12}	0.32	X^T	1900 MPa
Density	1.02 g/mm ³	Y^T	56 MPa
Ply thickness	0.188 mm	S	49 MPa

Table 4. Load Conditions

Load Condition	Nx (N/mm)	Ny (N/mm)	Nxy (N/mm)	Mx (Nm/mm/mm)
1	350	175	175	8896
2	350	175	-175	8896

Table 5. Optimum Results for Stiffened Composite Structures

Skin laminate	Stiffener laminate	Stiffener spacing (mm)	Weight (g/mm ²)
[-53/52/-28/29]s	[-44/56/2/2]s	483	0.0859
[-66/31/-27/48]s	[-5/53/-53/-5/9]s	660	0.0832
[-61/43/-23/40]s	[29/-4/56/-3/-56]s	762	0.0841
[38/-70/39/-31]s	[58/-59/10/-21/10/11/15]s	864	0.0848

표5에서 보여주는 최적설계는 보강재 사이의 간격이 4가지 경우의 최적설계치를 나타내고 있다. 이 결과는 동일한 알루미늄 설계의 경우보다 40%이상의 중량감소 효과를 나타내고 있다. 각 부재에 최소강도를 제약조건으로 줌으로써, 적층 각이 0도에서 멀어지려는 경향을 보여주고 있다. 전체에 걸리는 하중의 60%정도를 판부재가 받고 있으며, 40%의 하중을 보강재가 담당하고 있다.

5. 결 론

본 연구는 전통적인 것은 물론이고 고급기술이 포함된 복합재 구조물의 최적화를 위한 동시공학을 실제 설계에 적용하는데 초점을 맞춘 것으로 제작과정과 비용에 대한 최적설계에도 적용할 수 있으며, 전통적인 중량최소화 문제에도 적용할 수 있음을 보여주었다. 자세히 나누어지지는 않았지만 비용을 결정하기 위하여는 충분한 데이터가 필요하고, 해석이 매우 복잡한 설계의 경우에는 그 계산결과를 데이터 베이스화함으로 유사한 계산 결과에 응용할 수 있다. 따라서 초기설계 단계부터 최소화 중량 설계는 물론 비용 최소화를 위한 제작과정, 조립과정 등에 대하여 최적설계를 수행함으로, 구조물의 제작 비용 및 주기를 단축할 수 있다.

또한 설계단계상 강력한 전,후처리 과정을 가지고 있는 상용 프로그램들과 접합하여 사용함으로 동시공학설계 시스템의 장점인 설계과정을 가속화와 비용절감을 이룸은 물론 설계팀의 설계 효용을 증대할 수 있다. 또한 초기설계 단계부터 제작 이후의 설계의 영향을 사전에 평가함은 물론 필요에 따라 운용비용, 폐기비용, 재활용 등에 대하여 최적설계를 실시할 수도 있다. 동시공학의 중요한 분야인 모든 설계과정을 문서화하고 데이터베이스를 구축함으로 새로운 설계를 실시할 경우 이를 활용함으로 유사기관의 중복적인 투자를 방지할 수 있다. 가장 대표적인 예로서는 군용기술과 민수기술을 따로 개발할 필요없이 구축된 데이터베이스를 활용함으로 비용에 대한 정보나 설계과정, 실험 자료 등의 결과를 상호 공유함으로 중복을 방지할 수 있다.

예로써 복합재 구조물의 동시공학 최적설계를 수행하여 동일한 제작비용으로 40%의 하중을 감소시킬 수 있는 제작과정과 조립방법을 결정하였으며, 치수 최적화를 통하여 추가적인 제약조건들을 만족하며, 추가의 중량감소는 물론 여러 가지 대안이 되는 설계들을 제시함으로 설계의 유연성을 제공하였다. 동일한 알루미늄 구조물과 비교할 경우 50%이상의 중량을 감소하였으며, 조립과정이 줄어듬으로 재료비는 비싸지만 전체 제작비용은 10%정도 감소된 결과를 보여주었다.

참고문헌

1. Nanua Singer, "System Approach To Computer-Integrated Design and Manufacturing", John Wiley, 1996.
2. Haug, E. J., A Review of Distributed Parameter Structural Optimization Literature in Optimization of Distributed Parameter Structures (E. J. Haug & J. Cea, Eds.), Vol. 1, PP. 3-74, Alphen aan den Rijn: Sijthoff & Noordhoff, 1981.
3. Olhoff, N. & Taylor, J. E., On Structural Optimization, J. of Appl. Mech. 50, 1139-1151, 1983.
4. Eschenauer, H., Numerical and Experimental Investigations of Structural Optimization of Engineering Design, Siegen, Bonn + Fries, Druckerei und verlag, 1986.
5. Hörnlein, H. R.E. M., Take-off in Optimum Structural Design in Computer Aided Optimal Design, Structural and Mechanical Systems, NATO ASI Series F, Computer and System Sciences (C. A. Mota Soares, Ed.), Vol. 27, Springer-Verlag, 1987.
6. Eschenauer, H. A., Koski J., Osyczka, A., Multicriteria Design Optimization, Berlin-Heidelberg-NewYork, Springer-Verlag, 1990.
7. Gutkowsky, W., Controlled Enumeration with Constraint Variations in Discrete Structural Optimization, Lecture Minisymposium Structural Optimization, GAMM 1991, Cracow
8. Bendsøe, M., Kikuchi, N., Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Computer Methods Applied in Mechanics and Engineering, PP. 197-224, 1988.

9. Choi, K. K., Santos, J. L. T., Design Sensitivity Analysis of Nonlinear Structural Systems, Part I : Theory, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, No. 11, 1987, PP 2039-2055.
10. Santos, J. L. T., Choi, K. K., Sizing Design Sensitivity Analysis of Nonlinear Structural Systems Part II : Numerical Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 26, No. 9, 1988, PP 2097-2114.
11. PDA Engineering, PATRAN Plus User's Manuals Vols. I and II, Software Products Division, 1560 Brookhollow Drive, Santa Ana, CA, 1988.
12. PDA Engineering, PATRAN - ANSYS Interface Guide, Software Products Division, 1560 Brookhollow Drive, Santa Ana, CA, 1985.
13. PDA Engineering, PATRAN - MSC/NASTRAN Interface Guide, Software Products Division, 1560 Brookhollow Drive, Santa Ana, CA, 1988.

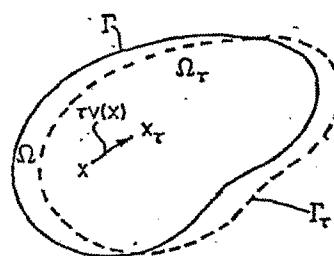
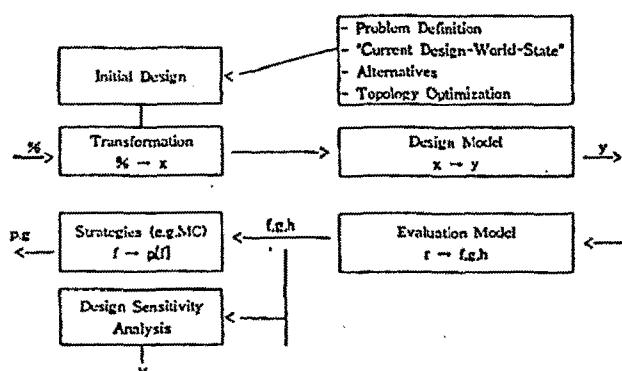
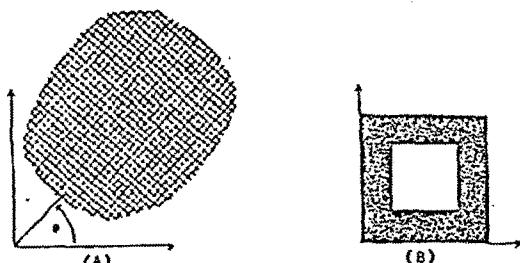


Fig. 2 Variation of Domain

Fig. 1 Modules of the Optimization Model



(A): Periodic Microstructure with Square Holes Rotated the Angle θ .
(B): Square Cell with a Square Hole

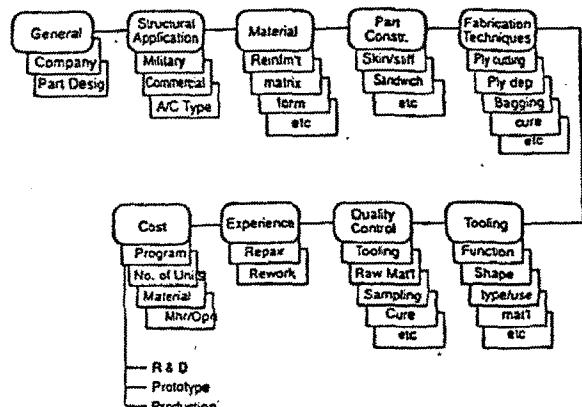


Figure 4. A Block Diagram of the ADAF.

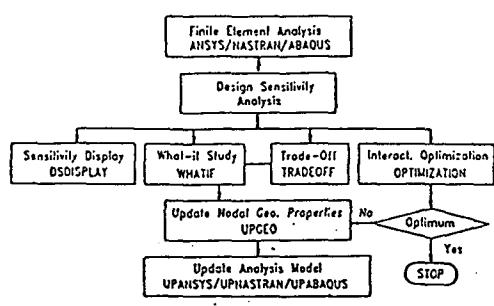


Figure 5. Post-processing Stage

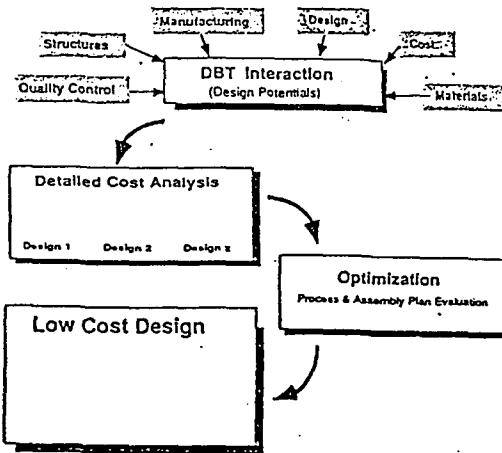


Figure 6. Design / Manufacturing Selection Process

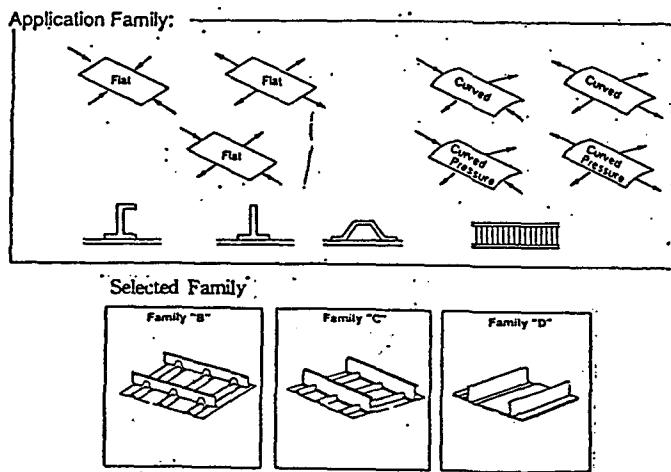


Figure 7. Selected Design Family

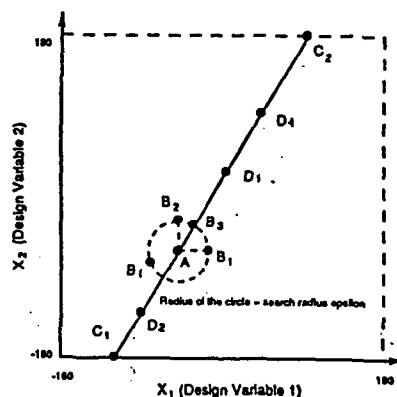


Figure 8. Operation of the Optimizer