

다분야통합최적설계의 전역탐색기법 응용



이 중 수*

1. 서 론

최적화기술은 수학적 토대 위에 공학적 설계방법론과 컴퓨터시스템 및 전산해석기술을 접목시키면서 개발 발전되어 기계, 항공 및 토목공학분야 등에서 구조물의 경량설계를 위해 적용되어 왔다. 그 이후, 형상 및 위상최적화로 그 범위를 확장하면서 다양한 구조설계를 위한 최적화기법들이 연구되었다. 그러나, 다기능, 다목적 등의 기술적 특성을 요구하는 제품의 설계를 위해서는 다수의 공학적 현상이 연관된 통합적 다분야해석 및 설계기술이 필요하다. 예를 들어 초음속 항공기설계의 경우, 수많은 설계변수와 구축조건을 요구하며 유체역학, 구조 및 재료, 동력학 및 제어, 열 및 추진공학 등 여러 가지 공학적 현상의 해석 및 설계상의 조정이 필요하다.

현실적이고 복잡한 시스템의 설계를 위해서는 다양한 공학분야의 전문가들이 협동하여 설계하여야 한다. 그 동안 각 분야별 시뮬레이션기법

해석기술이 많이 발전하여 그 정밀도는 점차 높아져 왔으나, 이에 따른 제품설계의 복잡성도 역시 증대되어 분야간 협동설계의 필요성이 요구된다. 즉, 다양한 해석분야의 공학적 설계원리를 동시에 고려하여 균형 있고 유기적인 방법으로 최적화를 수행하는 체계적인 설계자동화기술이 다분야통합최적설계 (multidisciplinary design optimization, MDO) 기술이며, 그 중요성이 점차 요구되고 있다.

2. MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION

MDO는 통합설계기술, 최적화기술, CAD/CAE 기술, design information 기술을 복합하여 여러 분야의 전문가들이 모여서 유기적이며 체계적으로 연구를 수행해야만 효과적인 결과를 창출할 수 있는 그룹지향형 기술이다. MDO에서는 단일 분야에 대한 최적화와는 달리 다양한 분야의 해

* 연세대학교 기계전자공학부, 조교수

석이 복잡하게 연계되어 있으므로 MDO기술의 효율성 제고를 위해서는 최적설계, 공학해석, CAD/CAE 및 컴퓨팅 기반구조 분야의 전문가들간의 협동적인 체계를 구축해야 한다. 이러한 공학설계에서 효율적인 최적화문제의 구성 및 결과의 산출을 위해서는 정보기술, 즉 문제의 해결공간이 되는 computing infrastructure의 구축이 필수적이다. 또한 실제 설계문제에 대한 적용연구를 통하여 많은 경험을 축적하고 반영시켜야 한다. 따라서 MDO는 최적화기술 및 이에 관련된 computing infrastructure의 구축, 통합설계기술에 관한 내용이 필요하며, 이를 토대로 유기성을 갖는 MDO Framework을 구현하게 된다. 그림 1은 MDO Framework의 구성도를 나타내고 있다.

MDO Framework의 개발현황을 보면 미국의 경우, MDO기술을 미래지향적 지식기반기술의 핵심으로 분류하여 이에 대한 국가적 지원을 강화하고 있다. Boeing 등 항공우주업체 및 GM과 Ford 등의 자동차 회사들은 NASA 및 NSF의 지원을 받는 대학들과 연계하여 MDO기술에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 특히, Boeing과 NASA가 공동으로 연구 개발하는 초대형 민간항공기인 HSCT(High Speed Civil Transport)의

설계에 MDO기술을 접목하여 획기적으로 개선된 항공기설계를 수행할 수 있음을 보고한 바 있다. 초기의 MDO기술은 주로 항공우주공학분야에 적용되었으나, 점차 조선, 화공, 반도체 분야 등 전공학분야로 적용범위가 확산되어 나가는 추세이다. 표 1은 해외에서 개발된 MDO Framework을 특징 및 적용분야별로 보여주고 있다.

3. 컴퓨팅 기반구조

MDO를 효과적으로 통합관리하고 연계사용을 지원하기 위해서는 다양한 CAD 및 CAE 도구들

표 1 MDO Framework의 해외 개발 현황

| Framework | 적용 | 개발기관 | 특징 |
|-----------|--------|-------------------------------|--|
| HISAIR | 항공기 설계 | NASA Langley | · 공력해석, 구조해석, 성능해석을 통합 · 파일형태의 데이터교환 |
| FIDO | 항공기 설계 | GIT | · 이기종 분산시스템에서 기본기능 구현 · PVM을 이용한 통신기능 |
| IDAS | 비행체 설계 | Rockwell | · 파일시스템을 이용한 연결 · 형상정의/해석, 최적화, 결과보고로 구성 |
| iSIGHT | 제품 설계 | ENGINEOUS Software | · 설계 및 해석 tool의 통합화 · 인공지능을 이용한 자동 설계 가능 |
| CONSENS | 설계 최적화 | SIFRAME Software Technologies | · SIFRAME이라는 절차지향적인 최적화기술 적용 · EU의 ESPRIT프로젝트의 일부 |
| Optimus | 제품 설계 | LMS Numerical Technologies | · 실험계획법 및 반응표면기법 채택 · 다수의 해석 프로그램과 자동으로 연결가능 |
| IVAD | 자동차 설계 | GM | · 구조/충돌/안전해석, 공력해석, 연비해석, 현가장치해석 등의 동시해석 수행 |

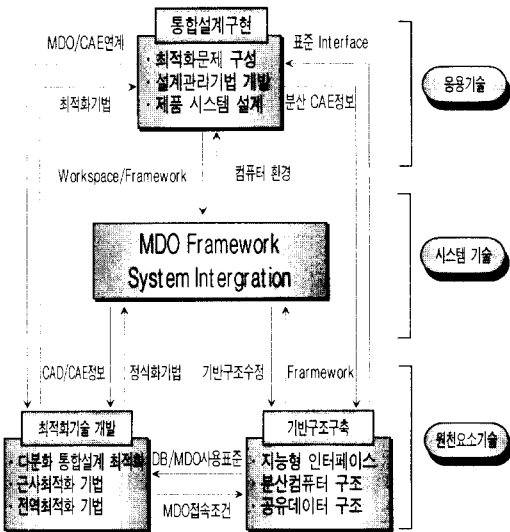


그림 1 MDO Framework

을 연계시키는 interface기술과 원활한 협동작업을 지원하기 위한 distributed computing구조가 요구된다. 또한 각 분야 및 도구간의 효율적 데이터 공유, 저장, 관리를 위한 설계데이터공유기술이 필요하다. 이러한 세 가지 핵심기술의 원천 요소는 다음 아래와 같으며, 기반구조간의 연계성을 그림 2에 나타내었다.

인터페이스기술

- 다양한 CAD/CAE간의 상충된 설계데이터 및 환경을 통합관리하는 컴퓨터지원시스템
- 서로 다른 CAD/CAE 도구간의 효율적 설계 데이터 호환
- 고난도 MDO기술의 대중화를 위한 편리한 사용자 인터페이스
- 설계지원 응용프로그램과 MDO 기반구조와의 통합을 용이하게 하기 위한 응용프로그램 인터페이스기술

분산컴퓨팅구조

- 설계, 해석 및 평가 등의 의사결정을 독립적으로 처리하기 위한 유기적인 통합시스템
- 다분야 전문지식이 효과적으로 교환되고 응용될 수 있도록 지원하는 협동설계 작업환경
- 유기적 설계작업 지원을 위한 총괄적 관리시스템
- 설계작업의 보안 및 안전성 제고를 통한 작업 안정화기술

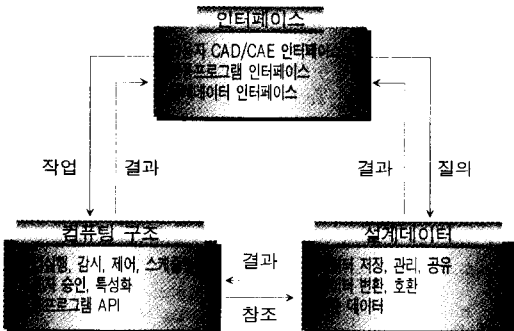


그림 2 컴퓨팅 기반구조

설계데이터 공유·저장 기술

- 서로 다른 CAD/CAE 도구 및 사용자간의 효율적 설계데이터 공유
- 표준 설계데이터 양식 연구를 통한 국제 산업표준화

4. MDO 방법론

전통적인 최적화방법은 목적함수, 설계변수 및 구속조건 등을 정의하는 최적화의 수학적 표현을 하나의 단위(all-in-one)로 묶어 해석용 CAE 소프트웨어와 연결하여 최적화를 수행하는 것인데, MDO에서는 대부분의 설계변수들이 다수의 공학적 현상과 연관되어 있으므로 최종적으로 얻어진 최적설계해의 의미를 판정하기 어려울 뿐 아니라, 대규모의 최적설계문제인 경우, 모든 설계변수가 최적설계에 도달하기 전에 수렴하는 경우가 발생한다. 이러한 MDO문제를 효율적으로 해결하기 위한 설계방법론으로서 분리기반 최적화(decomposition based optimization)기법이 적용되는데, 이 방법은 한 단위의 대규모 설계문제를 여러 개의 하부시스템으로 분리하여 독립적으로 설계를 수행하고 최종적으로 통합된 최적설계를 찾는 방법이다.

MDO문제의 전체 설계시스템은 설계변수의 구성 및 연관된 공학적 현상에 따라 hierarchical 또는 nonhierarchical system 등, 여러 형태의 하부시스템으로 분리할 수 있다. 특히, 비수직체계의 하부시스템(그림 3 참조)인 경우, paral-

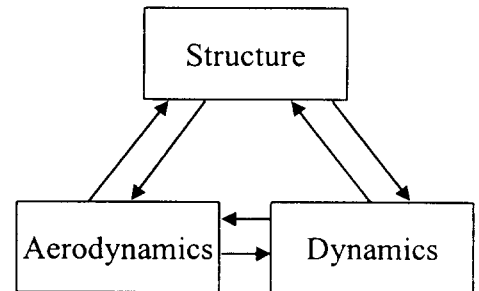


그림 3 Nonhierarchical system 분리

lel processing이 가능하다.

분리기반 최적화기법의 기본개념은 다량의 설계변수 및 구속조건으로 구성된 한 단위의 설계문제를 여러 개의 하부시스템으로 분리하는 것이다. 이 후, 분리된 하부시스템간의 유기적인 관계를 고려하여 개선된 국부적 설계해를 독립적으로 탐색하고, 중재(coordination) 및 통합화(integration)를 거쳐 최종적으로 시스템 목적을 만족시키는 최적설계해를 찾는 방법이다. 분리기반 최적화기법은 한 단위의 대규모 설계시스템을 다수의 하부시스템으로 최적분리하는 단계와 분리된 하부시스템간의 국부적 최적설계정보를 상호 중재하고 개선된 설계해를 탐색하여 전체적으로 균형된 최적설계로 통합하는 단계로 구성된다. 이때 각 하부시스템은 서로 강한 연관관계를 갖는 설계변수 및 구속함수로 분리, 구성되며, 하나의 하부시스템은 한 단위의 설계 문제보다 적은 수의 설계변수 및 구속조건으로 구성되므로 최적화 과정을 용이하게 수행할 수 있을 뿐 아니라, 각 하부시스템에 할당된 설계변수 및 설계요구조건에 대하여 전문적 지식을 갖는 설계자가 최적설계해를 판독하는데 효과적이다.

예를 들어 저진동형, 저소음형의 헬리콥터 블레이드를 설계하는 경우, 경량화 및 고강도를 위한 복합재료의 적층각/적층순서, 진동문제를 고려하기 위한 span방향에서의 tuning mass의 placement 및 크기, 공력 및 비행안정성의 제어를 위한 블레이드 twist 각도의 변화량, 공력소음의 저감을 위한 블레이드 tip의 형상 등을 설계변수로 고려해야 한다. 여기에는 공기역학, 구조역학 및 재료, 동역학, 제어 등의 다양한 공학적 해석이 필요하며 이를 근거로 설계의 구속조건들도 요구되는 전형적인 MDO문제이다. 표 2는 헬리콥터 블레이드 설계 문제에서 몇 가지 입력변수(설계변수)와 반응함수(목적함수 및 구속조건)사이의 연관성 및 영향정도를 보여주는데, S와 W는 각각, 강한 연관성(strong coupling) 및 미약한 연관성(weak coupling)을 의미한다. 이러한 최적설계 예의 경우, 비수직적 구조로 분리하여 서로 연관성이 강한 설계 변수 및 구속 조

표 2 다분야 공학적 현상의 연관성

| design variables | Aerodynamics | Dynamics | Structures |
|------------------|--------------|----------|------------|
| planform | S | S | S |
| blade twist | S | S | W |
| tip speed | S | S | S |
| stiffnesses | S | S | S |
| tuning mass | W | S | S |

건들로 이루어진 여러 개의 하부 시스템을 생성할 수 있다.

5. 전역최적화기법

분리기반 최적화방법에서 각 하부시스템에 적용되는 최적화기법으로는 sequential approximate optimization, penalty function method 및 Lagrange Multiplier 방법 등에 의한 비선형 수리계획법과 설계민감도해석에 의한 구배기반 최적화기법이 유용하게 쓰이고 있다.

대부분의 설계문제는 연속형, 정수형 및 이산형 등의 혼합된 설계변수로 표현되며, 해석모델에 대한 지배방정식은 비선형의 특성을 내포한다. 또한, 설계공간은 disjoint하거나 nonconvex하므로 다량의 국부적 최적설계가 존재할 가능성을 갖는다. 그러므로 설계시스템의 다양성을 고려하고 전역해를 탐색할 수 있는 최적설계기법이 요구되는데 유전알고리즘(genetic algorithms, GA), 진화연산, 신경회로망 및 fuzzy system과 같은 computational intelligence 또는 soft computing기술이 효과적으로 적용되고 있다. 특히, 유전 알고리즘은 복합재료의 적층각 또는 적층순서 등의 이산변수(discrete design variable)를 효율적으로 처리할 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 복합재 구조물의 최적화 분야에 적용되고 있다

컴퓨터과학분야에서 출발한 computational intelligence기법이 최근에 와서 공학적 설계문제 적용에 관심을 갖게 되었으며, Boeing-777의 터빈날개를 유전알고리즘에 적용하여 최적설계를

수행한 사례가 있다. 설계시스템이 다양화되고 복잡해지면서 설계문제에 포함하는 설계변수 형태의 혼합화 및 설계공간의 불연속성, 정확한 수치데이터로 표현되지 않는 설계요구조건들이 발생하면서 deterministic search 방법으로서의 한계를 극복하고 설계문제에 내재된 비선형성으로 인한 다수의 국부설계의 탐색 및 제품설계에 중요한 요인으로 작용하는 설계기간의 단축 문제 등을 해결하기 위해 stochastic search의 특성을 갖는 전역최적화(global optimization)기법이 MDO에 필요하게 된다.

5.1 유전알고리즘

유전알고리즘 등과 같은 진화적 탐색방법은 생물체의 적자생존(survival of the fittest)의 원리를 응용하는데, 한 세대 당 다량의 설계집단(multiple design populations)의 확률적 분포를 기본으로 하여 암호화된 설계변수가 생물학적 유전의 기본원리인 재생(reproduction), 교배(cross-over) 및 돌연변이(mutation) 발생 등의 과정을

반복적으로 거침으로써, 새로운 설계변수를 생성하거나 이를 이용하여 개선된 설계해를 탐색하고 목적함수를 최적화 한다. 유전알고리즘에서는 반복 과정시, 한 개의 해만이 개선되는 것이 아니라 다수의 설계집단이 유전과정을 통하여 설계목적에 대해 향상된 또 다른 다수의 설계집단으로 이동하므로 극대 및 극소해가 다량으로 존재하는 nonconvexity 형태의 탐색문제에 적용 가능하다. 또한, 유전알고리즘은 함수의 미분 등을 요구하는 민감도의 해석과정 없이 함수정보 자체만으로 최적설계를 탐색하는 특징이 있다.

초기 단계의 유전알고리즘의 최적화 응용은 다량의 국부적 최적해가 존재하는 문제 또는 이산형, 정수형 설계변수를 갖는 구조설계 문제에 적용되어 왔으나, 암호화된 설계 해의 탐색 및 발견이라는 특성을 이용하여 면역회로망(immune network modeling) 및 분류시스템(classifier systems) 등에 응용되어 설계해의 새로운 pattern recognition, discovery 및 설계정보 identification 분야에 적용되고 있다.

5.2 신경회로망

대부분의 수치적 최적화 문제는 CAE 및 유한요소해석 프로그램 수행과정에서 계산량이 방대하게 요구되므로 설계해를 신속하게 탐색하기 위해 함수근사화기법이 필요하다. 유전알고리즘에서는 각 설계변수의 이동제한(move limit)을 적용시킬 수 없기 때문에 일반적으로 구배기반 탐

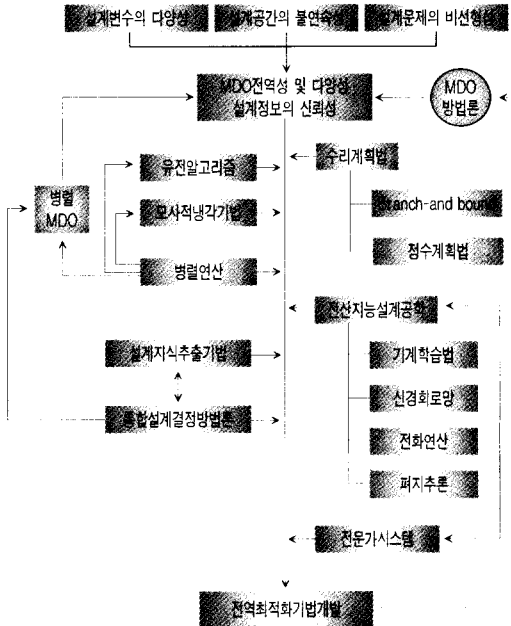


그림 4 MDO의 전역최적화기법

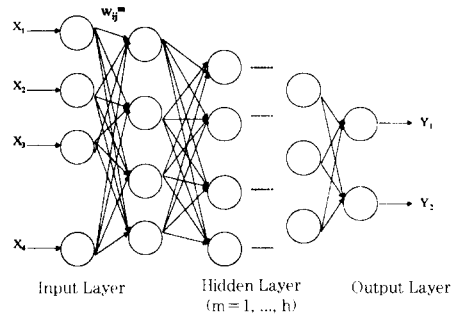


그림 5 BPN 모델

색기법에서 사용되는 제1차 테일러급수 함수 근사화는 전역적 탐색기법의 성격과 맞지 않는다. 그러므로 유전알고리즘기반 최적설계 환경 하에서는 전역적 함수근사화를 표현할 수 있는 다항식 (polynomials) 또는 신경회로망 (neural networks) 모델기법을 사용한 반응표면기법 (response surface techniques)이 사용되고 있으며, 이러한 근사해법들은 구배에 의한 계산과정 없이 함수값 자체만으로 구성할 수 있는 장점이 있다.

5.3 유전알고리즘과 신경회로망의 관계

최근 들어 이러한 전역함수근사화를 이용하여 유전알고리즘기반 최적설계 문제가 활발히 연구되고 있으며 다양한 설계문제의 특성을 살릴 수 있는 여러 형태의 신경회로망모델이 적용되고 있다. 신경회로망과 유전알고리즘은 기계구조물의 설계최적화 분야에서 각각, 설계해의 근사화 및 탐색이라는 상호 연관성을 내포하는데 신경회로망은 급속 함수근사화의 기능뿐 아니라, 그림 5와 같은 다층역전파신경회로망 (multilayered feedforward backpropagation neural network, BPN)의 경우, 회로망 사이에 존재하는 상호연결가중치행렬 (interconnection weight matrix)로부터 전체 설계공간에서의 입출력 데이터의 흐름을 파악하여 각 설계변수와 반응함수 사이의 의존도 또는 인과관계 (causality)를 정성적으로 분석함으로써 전역적 민감도에 대한 정보를 생성할 수 있다.

이러한 가중치해석은 유전알고리즘이 갖지 않는 민감도 평가 부분을 보완해 줄 수 있다. 또한, 전역적 탐색환경 하에서 분리기반 설계에 최적화 문제를 수행하는 경우, 대규모의 단일 시스템을 분리하는 기초적 자료로 사용될 수 있다. 즉, 가중치 해석에 의한 행렬식은 서로 강한 연관관계를 갖는 설계변수와 구속함수로 이루어진 다량의 소규모 하부시스템을 구성하는데 유용한 정보를 제공한다.

6. 전역최적화기반 MDO

분리기반 최적화기법에서 가장 단순한 형태의 최적해 통합화 방법은 하나의 하부시스템에서 탐

색한 가장 좋은 설계해를 다른 하부시스템에서 새로운 설계입력 파라미터 (problem parameter)로 고려하여 반복적인 최적화 과정을 거치는 것이다. 그러나 이러한 방법에서는 설계해의 요동 (design fluctuation)이 발생할 수 있으며, 정확한 해의 수렴성을 보장하지 못한다. 또한, 각 하부시스템에서 얻어지는 최적설계해는 유전알고리즘을 통해 다수의 유용한 설계 집단 (feasible design population)으로 생성되므로 유용한 설계 중, 어떤 것을 선택하여 다른 하부시스템의 파라미터로 전달하는가에 따라 해의 수렴도 및 정확도를 결정하게 된다.

만일, 하부시스템의 분리가 완전 분리가능 (completely decomposable)하다면, 각 하부시스템에서 얻어진 설계해는 최종 최적값이 될 수 있지만, 대부분의 공학적 설계문제에서는 분리된 하부시스템간의 어느 정도의 상호 연성의 관계가 유지되고 있으므로 분리된 시스템간의 설계해의 조정 및 통합화 과정이 필요하다.

유전알고리즘이 제공하는 다수의 유용한 설계 중에서 가장 좋은 값을 현재 하부시스템의 최적 설계로 선정하고, 이를 다시 다른 하부시스템의 새로운 파라미터로 고려하여 반복적인 최적화 과정을 수행할 경우, 다른 하부시스템에 전달되는 설계입력 파라미터는 상호 연관성 때문에 항상 최적조건이 아닐 가능성이 높다. 이러한 하부시스템간의 연성관계를 고려하여 새로운 파라미터를 선정하기 위해서는 다수의 유용한 설계해의 공통적인 특성을 하나의 설계값으로 대응 시켜야 하는데 이를 위해 면역회로망 (immune network system)을 응용한다. 하나의 하부시스템으로부터 얻은 유용한 설계해의 일정 부분을 항원 (antigens)의 유전배열인자로 암호화하고, 다른 하부시스템으로부터 얻은 설계해를 항체 (antibodies)로 암호화하여 다량의 항원과 항체의 복합적 결합 (그림 6 참조)을 통해 전체 설계집단의 통합화에 최적의 결과를 제공하는 유전인자를 탐색한다.

그림 7는 신경회로망 및 유전알고리즘을 전역탐색기법으로 사용한 MDO의 분리기반 최적화에 대한 개략적인 설계시스템의 흐름도를 보여준다.

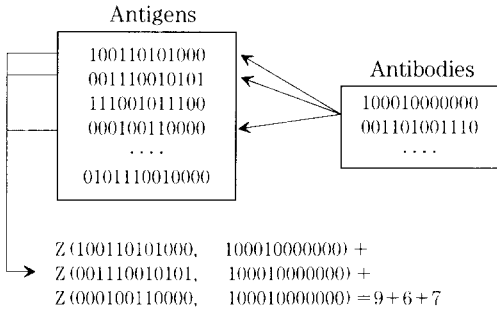


그림 6 면역시스템 모델

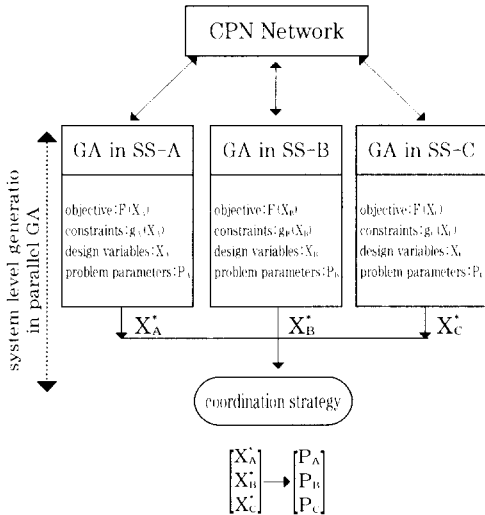


그림 7 MDO 설계체계 흐름도

7. 결 론

다양한 해석분야의 공학적 설계원리를 동시에 고려하여 균형 있고 유기적인 방법으로 최적화를 수행하는 체계적인 설계자동화기술인 MDO의 효율적인 설계방법론으로 분리기반 최적화기법을 소개하였고, MDO의 다양성 및 다분야통합의 상호 연관성 등을 고려하여 최적화의 탐색기법 및 함수근사화모델로 유전알고리즘 및 신경회로망과 같은 전산지능기술의 필요성 및 그 내용을 기술하였다.

참 고 문 헌

1. H. Adelman and W. A. Mantay (editors), *Integrated Multidisciplinary Optimization of Rotorcraft: A Plan for Development*, NASA TM-101617, 1989
2. J. Sobieski, *Optimization by Decomposition: A Step from Hierarchic to Non-Hierarchic Systems*, NASA TM-101494, 1988
3. P. Hajela, C. L. Bloebaum and J. Sobieski, "Application of Global Sensitivity Equations in Multidisciplinary Aircraft Synthesis", *Journal of Aircraft*, Vol. 27, No. 12, 1996, pp.1002~1010
4. C. L. Bloebaum, *Formal and Heuristic Decomposition Methods in Multidisciplinary Synthesis*, Ph. D. Dissertation in Aerospace Engineering, the University of Florida, Gainesville, FL, 1991
5. V. O. Balabanov, *Development of Approximations for HSCW Wing Bending Material Weight Using Response Surface Methodology*, Ph. D. Dissertation in Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, VA, 1997
6. T. C. Wagner and P. Y. Papalambros, "A General Framework for Decomposition Analysis in Optimal Design", *Advances in Design Automation-1993*, ASME, B.J. Gilmore, (editor), Vol. 2, 1993, pp.315~325
7. J. Bohlmann and R. Scott, "A Taguchi Study of the Aeroelastic Tailoring Design Process", *Proceedings of the 32nd SDM Conference*, the AIAA Paper No. 91-1041, Baltimore, MD, 1991
8. J. Lee and P. Hajela, "Parallel Genetic Algorithm Implementation in Multidisciplinary Rotor Blade Design", *Journal of Aircraft*, Vol. 33, No. 5, 1996, pp.962~969
9. Z. Szewczyk and P. Hajela, Neural Network

- Approximations in a Simulated Annealing Based Optimal Structural Design, Proceedings of the Society of Engineering Science Meeting, Gainesville, FL, 1991
10. M. N. Huhns and M. P. Singh, (editors), Readings in Agents, Morgan Kaufmann, 1997
 11. M. A. Hale and J. I. Craig, Preliminary Development of Agent Technologies for a Design Integration Framework, 5th Symposium on Multi-disciplinary Analysis and Optimization (AIAA-94), 1994, pp.1~10
 12. A. O. Salas and J. C. Townsend, Framework Requirements for MDO Application Development, AIAA-98, 1998, pp.261~271
 13. G. Cornell and C. S. Horstmann, *Core Java*, SunSoft Press, second edition, 1997
 14. J. Siegel, *CORBA Fundamentals and Programming*, John Wiley & Sons, 1996
 15. R. Orfali, D. Harkey and J. Edwards, *The Essential Distributed Objects Survival Guide*, John Wiley & Sons, 1996 