대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 A pp. 818~823 KSME 00F122

효율적 분산협동설계를 위한 분해 기반 병렬화 기법의 개발

박형욱* · 김성찬* · 김민수** · 최동훈***

Decomposition Based Parallel Processing Technique for Efficient Collaborative Optimization

Hyung-Wook Park, Sung-Chan Kim, Min-Soo Kim and Dong-Hoon Choi

Key Words : Multidisciplinary Design Optimization(다분야최적설계), Parallel Decomposition(병렬 분해), All at once method(일괄처리법), Sequential Decomposition(순차분해), MDASS(다분야 해석 하부시스템), Design Structure Matrix(설계구조행렬), Collaborative Optimization(협동최적설계)

Abstract

In practical design studies, most of designers solve multidisciplinary problems with complex design structure. These multidisciplinary problems have hundreds of analysis and thousands of variables. The sequence of process to solve these problems affects the speed of total design cycle. Thus it is very important for designer to reorder original design processes to minimize total cost and time. This is accomplished by decomposing large multidisciplinary problem into several multidisciplinary analysis subsystem (MDASS) and processing it in parallel. This paper proposes new strategy for parallel decomposition of multidisciplinary problem to raise design efficiency by using genetic algorithm and shows the relationship between decomposition and multidisciplinary design optimization (MDO) methodology

기 호 설 명

f_k : 전방 연관(forward coupling)
b_k : 후방 연관(backward coupling)
c_u : 상부 연관(upper coupling)
c_l : 하부 연관(lower coupling)
p_i^j : i 번째 하부시스템내의 j 번째 분야
N_t : 전체 분야 개수
F : 전체 하부시스템 개수

* 한양대학교 대학원 기계설계학과
** 회원, 한양대학교, BK21 기계분야 계약교수
*** 회원, 한양대학교, 최적설계신기술연구센터

1. 서 론

오늘날 대부분의 설계는 구조해석, 유동해석, 동역학해석 등의 다분야를 동시에 고려해야 하는 경우가 주종을 이루고 있다. 또한 바람직한 설계를 위해서 다양한 설계조건의 통합화, 복잡한 설계절차의 자동화, 다분야를 동시에 고려한 설계해의 최적화가 긴요하다.

이러한 다분야통합최적설계기술(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)[1,2,3]은 설계의 효율성이나 비용을 고려할 때 기존의 설계에 비해 많은 이점을 가지는 것으로 알려져 있다. 그러나 여러 분야가 복잡하게 연관(coupling)되어 있기 때문에 수많은 설계변수를 가지고 있으며 복잡한 해석절차를 필요로 한다. 따라서 설계문제를 적절히 분해하여 효율을 높인다는 측면에서 전체 시스템을

여러개의 하부시스템(Multi-Disciplinary Analysis Sub-System, MDASS)으로 나누어 병렬처리를 하기 위한 분해 방법이 요구되며 이러한 분해 방법은 다분야통합최적설계 방법론을 적용하기 위한 전처리 과정으로서 반드시 필요한 과정이라 할 수 있다. 즉 복잡하게 연관되어있는 MDO 문제를 전통적인 최적화 방법인 목적함수, 설계변수 및 구속조건 등을 정의하는 하나의 해석모듈로 구성하여 접근(all-at-once method)하지 않고 네트웍 기반의 분산 컴퓨팅과 병렬처리기법을 고려하여 전체 시스템을 여러 개의 하부시스템으로 분해하는 기법이 필요하다.[4,5] 이러한 분해기법에서는 하부시스템간의 연관과 하부시스템내의 피드백 루프를 동시에 줄이도록 시스템을 재구성하여야 한다. 왜냐하면 하부시스템간의 연관은 다분야통합최적설계방법론을 적용하여 설계를 할 때 시스템간의 일관성을 유지하기 위한 구속조건으로 표현되기 때문에 최적화 알고리즘에 부담을 증가시키는 요인으로 작용한다. 그리고 하부시스템 내의 피드백 루프는 반복연산을 유발하므로 시스템 설계에 소요되는 시간을 증가시키는 문제가 있다.

Rogers 는 이러한 고려사항 중에서 시스템 내의 피드백 루프에 의한 CPU 시간을 줄이는 순차 분해법(sequential decomposition)을 구현하였다. 그는 전체 시스템의 분야간의 관계를 보기 쉽게 나타낸 설계 구조행렬(Design Structure Matrix, DSM)과 유전자 알고리듬을 이용하여 분야의 순서를 바꿔주는 스케줄링 작업으로 피드백에 의한 반복연산을 줄이고자 하였다.[6,7,8,9] 이러한 이론을 좀 더 발전시켜 Kroo 는 다분야 설계문제를 스케줄링함과 동시에 병렬 처리를 위해 전체 시스템을 몇 개의 하부시스템으로 나누어 효율을 높이려고 하였다.[10,11] 그러나 병렬처리를 위한 고려 사항은 설계자의 경험에 의하여 분류하는 한계가 있었다. 따라서 이들 두 연구는 실제로 전체시스템을 하부시스템으로 나누고 하부시스템 간의 연관과 피드백에 의한 반복연산을 줄이는 방법을 구체적으로 제시하지 못하였으며 결론적으로 네트웍 기반의 협동최적설계를 위한 분해 방법론으로는 부족한 면이 있음을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 네트웍 기반의 컴퓨팅 환경 하에서 협동최적설계를 수행하고자 할 때 병렬처리가 가능하도록 시스템을 여러 개의 하부시스템으로 분해하는 기법을 제시하고자 한다[12]. 하부시스템 내의 피드백을 줄이기 위해서 Rogers 와 Kroo 가 제시한 순차 분해법을 이용하고자 하며, 하부시스템간의 연관을 줄이기 위한 인자를 유전자알고리즘의 적합도 함수에 추가함으로써 다분야통합최적설계 방법론을 적용하기 위한 새로운 새로운 병렬 처리기반 분해 기법 (parallel processing based decomposition) 을 제시하고자 한다.

이를 위해 2 장에서는 다분야 설계문제를 풀기 위한 일반적인 방법론에 대해 설명하고, 이를 위한 분해기법 중 일괄처리 와 협동 최적설계를 위한 병렬 분해법에 동시에 적용되는 순차 분해법에 대해 알아보고,[13] 3 장에서는 본 논문에서 제시하는 협동최적설계의 핵심 내용인 병렬 처리를 구현하기 위한 병렬 분해법(parallel decomposition)과 여기에 사용된 유전자 알고리듬에 관해 간략하게 설명하고, 4 장에서는 위의 내용에 근거한 적용 예를 바탕으로 병렬처리 분해법의 결과를 분석한다. 마지막으로 5 장에서는 결론을 맺고 향후 계획을 밝히고자 한다.

2. 다분야 설계문제의 분해 기법

2.1 다분야최적설계를 위한 방법론

다분야최적설계문제를 풀기 위해서는 우선 선행 되어야 할 과제가 있다. 여러 연구들에서 제시된 해석을 적절한 순서로 재배열하여 최적설계에 적합한 구조로 구성하여야 한다. 예를 들어 기존에 수행되어온 일괄처리 방법으로 다분야 통합최적설계 문제의 해를 얻고자 한다면 Rogers 가 제시한 순차 분해법을 이용하여 전체 분야를 재구성함으로써 시스템 해석에 소요되는 시간을 줄이는 분해법이 적합하다.

그러나 일괄처리 방식이 아닌 분산협동최적설계(Collaborative Optimization, CO)[14]와 같은 방법을 이용하고자 한다면 기존에 제시된 순차 분해법만으로는 적절하게 시스템 분해를 수행할 수가 없다. 다시 말해서 병렬처리를 위해 전체 시스템을 몇 개의 하부시스템으로 분해하여야 하는데 위의 순차 분해법은 이러한 점을 고려하지 않기 때문이다.

따라서 새로운 분해법을 개발할 필요가 있는데 이는 본 논문에서 제시하는 병렬 분해법을 개발하게 된 배경이 된다. 다음 절에서는 MDO 를 위한 분해법 중 가장 일반적이라 할 수 있는 순차 분해에 대해서 설명하고 병렬분해법의 필요성을 구체적으로 언급할 것이다.

2.2 순차 분해법

다분야 설계 문제는 다양한 해석을 필요로 하

는 여러 분야가 서로 연관되어 있으므로 설계규모가 크고 그에 따라 많은 해석 시간(CPU time)과 설계 비용을 필요로 한다. 다양한 설계분야 들이 하나의 설계문제에 나타나기 때문에 전통적인 최적화 방법론을 이용하여 설계를 수행하는데 어려움이 많다.

이러한 다분야 설계 문제를 해결하기 위한 방법론 중 대표적으로 협동최적설계를 들 수 있는데, 전체 시스템을 몇 개의 하부시스템으로 나누어 네트웍 기반의 병렬처리를 도입하게 되면 효율을 높일 수 있다.

따라서 본 논문은 병렬처리를 위해 전체 시스템을 몇 개의 하부시스템으로 나누는 병렬 분해법과 동시에 각각의 하부시스템 내부의 프로세스간의 연관과 하부시스템간의 연관을 스케줄링하는 순차 분해법을 적용하였다.

순차 분해법은 설계 분야간의 연관 관계를 보기 쉽게 나타낸 설계구조행렬을 이용하여 반복연산을 야기하는 피드백 루프를 줄이기 위해 분야들의 순서를 유전자 알고리즘의 조합 최적화 방법을 통해 재배열 함으로서 피드백 루프를 피드포워드 루프로 바꿔주는 분해법이다. 여기서 설계구조 행렬은 Steward[15]에 의해 개발된 도구로 다분야가 연관되어있는 설계문제의 연관 관계를 행렬구조를 이용하여 쉽게 알아볼 수 있도록 만든 도구이다. 이해를 돕기 위해 Rogers 가 대표적인 MDO 문제인 항공기 설계 문제에 순차 분해법을 적용한 경우를 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 으로 설명하면 다음과 같다. Fig. 2 가 일반적인 다분야 설계문제

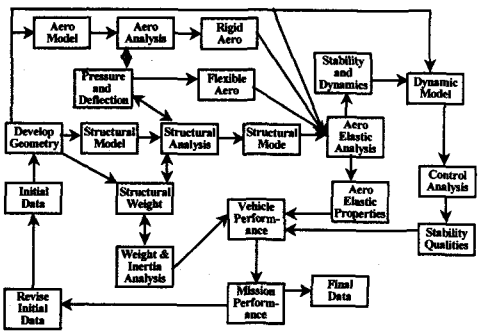


Fig. 2 General design process of MDO problem

의 분야간의 흐름도라고 할 때, Fig. 3 은 설계구조행렬을 이용하여 전체 분야를 보다 보기 쉽고 다루기 쉽게 나타낸 그림이다. Fig. 3 에서 대각선 방향으로 늘어선 박스들은 다분야최적설계문제가 포함하고 있는 각각의 설계 분야들을 나타내고 이들을 연결하는 선들 중에서 수평선은 각

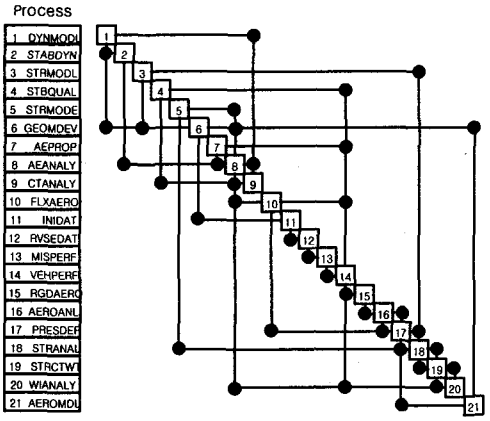


Fig. 3 Unsequenced DSM for sample MDO problem

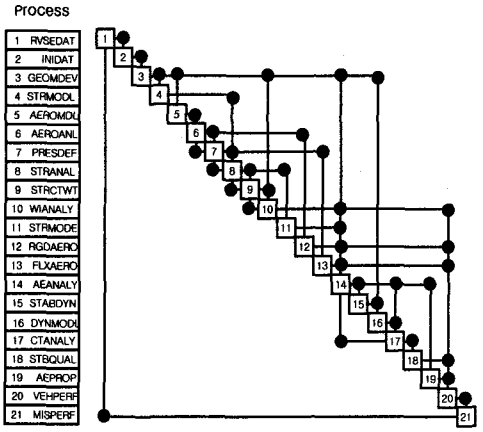


Fig. 4 Sequenced DSM for sample MDO problem

분야에서 나온 결과값을 수직선은 분야로 들어가는 입력값을 나타낸다. 수직선과 수평선에 의해 연결되는 분야들은 서로 연관 되어 있음을 의미하며, 설계 구조행렬 대각선 위쪽 삼각형 영역은 피드 포워드 영역이고 아래쪽 삼각형 영역은 피드백 영역이다. 두 분야간의 피드백에의한 반복연산은 각 분야의 해석값이 수렴할 때 까지 진행되므로 전체 설계 관점에서 볼 때 피드백 루프는 설계 시간을 늘리는 주요 요인이 된다.

따라서 유전자 알고리즘을 이용하여 전체 분야를 재배열 하여 피드백 루프를 줄이게 되면 Fig. 3 에서 Fig. 4 형태의 결과를 얻게 된다. Fig. 4 은 순차 분해법을 적용하여 분야들간에 피드백 루프를 줄인 그림이다.

앞서 설명한 바와 같이 Rogers[1,2]는 MDO 문제를 풀기위한 방법론 중 일괄처리법에 적합한 순차 분해법을 구현 하였다. 즉 분야간의 관계를 보기 쉽게 나타낸 설계 구조행렬과 유전자 알고리

듬을 이용하여 분야의 순서를 바꿔주는 스케줄링 작업으로 피드백 루프에 의한 반복연산을 줄이려고 하였다. 그러나 협동최적설계 관점에서 볼 때 Rogers 가 적용한 순차 분해법 만으로는 전체 설계문제를 한꺼번에 일괄적으로 풀어내므로 병렬처리에 의한 효율을 기대할 수 없게 되는 것 이다.

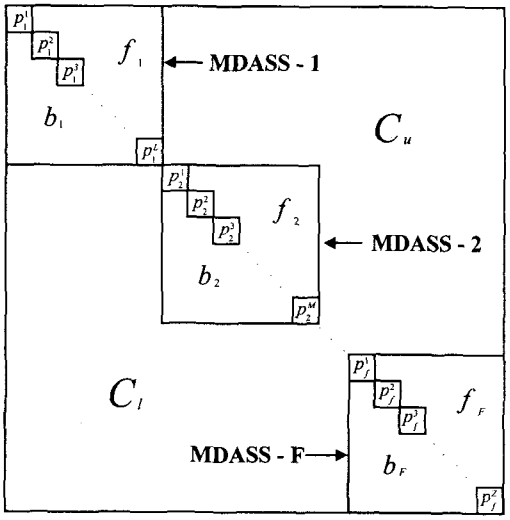
따라서 협동최적설계를 위해 전체를 몇 개의 하부시스템으로 나누는 새로운 분해방법이 필요하게 된다. 여기서 다분야최적설계 문제의 스케줄링 작업을 위한 분해법인 순차 분해법에 대한 설명을 마치고 3 장에서는 분산협동최적설계를 구현하기 위한 병렬 분해법에 대해서 설명 할 것이다.

3. 병렬 분해법

3.1 병렬 처리를 위한 분해 기술

다분야가 연관된 복잡한 설계 문제를 설계하고자 할 때, 복잡한 설계문제를 여러 개로 분해하여 전체 설계의 효율을 높인다는 측면에서 네트워크 기반의 병렬 처리를 도입하는 것은 상당히 유리하다. 이 때 병렬처리를 위해 다분야 설계 문제를 어떻게 분해하느냐 하는 문제가 대두되는데 이는 본 논문에서 제시하는 병렬 분해법을 적용하면 가능해진다. 앞서 설명한 순차 분해법은 설계 구조행렬을 토대로 조합최적화 방법을 통해 반복 연산을 야기하는 분야간의 피드백 루프를 줄이고자 하는데 그 목적이 있다. 여기에 전체 시스템을 사용 가능한 컴퓨팅 환경에 따라 여러 개의 하부시스템으로 나누는 분해법을 적용하고, 반복 연산을 야기하는 각 하부시스템 간의 연관과 하부시스템 내의 피드백 루프를 동시에 줄이는 방식으로 접근하면 병렬 분해법을 구현할 수 있다. Fig. 5 를 통해 위의 내용을 설명하면 다음과 같다.

우리는 병렬 분해법을 통해 구현할 수 있는 일반적인 설계 구조행렬을 하부시스템인 MDASS 와 피드백 루프와 피드포워드 루프 그리고 연관 루프에 해당하는 부분으로 Fig. 5 에 도식적으로 나타내었다. 전체 시스템은 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 몇 개의 하부시스템으로 나눠진다. 이때 하부시스템들의 해석은 각각 네트웍상에서 할당된 컴퓨터에서 수행되기 때문에 수렴조건을 만족 할 때까지 반복연산을 야기하는 피드백 루프는 가급적 없애도록 해야 한다. 이는 앞서 순차 분해법에서 설명한 것과 같이 모듈간의 수행 순서를 변경하여 피드백 루프를 피드포워드 루프로 바꿔 줌으로서 가능하다. 또한 분산협동최적설계시에 문제가 되는 하부시스템간의 연관도 고려해야 한다.



$$f_k = \sum_{i=1}^{u-1} \sum_{j=1+1}^{u} DSM(i,j)$$

$$b_k = \sum_{i=1+1}^{u} \sum_{j=1}^{u-1} DSM(i,j)(i-j)$$

$$c_U = \sum_{i=1}^{N_t-1} \sum_{j=2}^{N_t} DSM(i,j) - \sum_{k=1}^{N} f_k$$

$$c_L = \sum_{i=2}^{N_t-1} \sum_{j=1}^{N_t} DSM(i,j) - \sum_{k=1}^{N} \left[\sum_{i=1}^{u} \sum_{j=1}^{u-1} DSM(i,j) \right]$$

$$l = \sum_{p=0}^{k-1} n_p + 1 \;,\; u = \sum_{p=1}^{k} n_p \;,\; N_t = \sum_{p=0}^{N} n_p \;,\; n_0 = 0$$

Fig. 5 DSM of decomposed system for parallel processing

왜냐하면 하부시스템을 병렬 처리하고자 할 때 하부시스템간에 연관된 상태변수가 많을수록 해석시간을 늘리는 요인이 되므로 분산협동최적설계가 지향하는 목적에 배치되기 때문이다. Fig. 5 에서의의 수식을 보면 DSM(i,j)는 설계구조 행렬 내에서 연관이 있는 분야들이 담고있는 상태변수의 수를 나타낸다. DSM(i,j)의 값은 설계구조 행렬상에서 (i,j)번째 연관에 해당하는 모듈사이에 연관계가 없으면 0 이 되며 연관된 변수의 개수가 n 개이면 DSM(i,j)의 값은 n 으로 설정된다. f_k 는 분야들간의 전방 연관에 해당하고, b_k 는 분야들간의 후방 연관 연관에 해당한다. 하부시스템내의 후방 연관 중 상대적으로 멀리 떨어진 분야들간의 연관은 서로 인접해있는 후방 연관에 비하여 해석

시간이 더 많이 소요 되므로 유전자 알고리즘의 연산 과정에서 고려해 주기위해 거리인자를 곱하였다. c_u와 c_l로 표시되는 상부 연관과 하부연관은 하부시스템간의 연관을 나타내고 각각이 설계 구조 행렬의 $N_t \times N_t$ 행렬 내에서 차지하고 있는 부분을 나타내고 있다.

다음절에서는 본 논문에서 사용된 유전자 알고리즘과 병렬 분해법을 구현하기 위해 제시된 적합도 함수를 소개하겠다.

3.2 순열 기반 유전자 알고리즘

본 연구에 이용된 유전자 알고리듬은 각 분야를 설계 변수인 유전자라 가정하고 이들의 집합체인 전체 분야들을 하나의 염색체로 가정하여 조합최적화를 수행하는 순열 기반 유전자 알고리듬(permutation based genetic algorithms) 이다. 우리는 이러한 유전자 알고리듬의 연산을 통해 적합도 함수의 값을 최대화 시키는 방향으로 교배연산과 변이연산을 수행하여 Fig. 5 와 같은 구조의 설계 구조행렬을 만들어 낼 수 있는 것이다. 여기서 본 논문에서 제시한 유전자 알고리즘의 적합도 함수를 Fig. 5 를 이용하여 정식화 하면 다음과 같다.

$$\text{Fitness} = \text{maxmize}\left\{\frac{\min\limits_{k=1\cdots N} f_k}{1+\max[w_1(\min\limits_{k=1\cdots N} b_k), w_2(\max c_{L,U})]}\right\}$$

k : *MDASS No.*

적합도 함수를 구성하고 있는 부분을 살펴보면 $\min b_k$는 하부시스템 내에서 후방 연관이 가장 적은 부분의 값을, $\max c_{L,u}$는 하부시스템 간의 위쪽과 아래쪽 연관 중에서 가장 많은 상태 변수를 포함하고 있는 부분의 값을, $\min f_k$는 하부시스템 내에서 전방 연관이 가장 큰 부분의 값을 나타내고, 전체를 최대화 함으로써 앞서 설명한 형태의 설계 구조행렬을 얻어내도록 수식화 하였다.

여기서 우리는 적합도 함수를 구성하기 위해 다중 목적함수의 선호함수(preference function)중 Min-max 함수를 적용하였다.

4. 병렬 분해법의 적용 예

본 장에서는 제 2 절과 제 3 절의 연구를 토대로하여 다분야 설계문제에 병렬 분해법을 적용하여 전체 시스템을 하부시스템으로 나누고 분야간의 연관과 피드백 루프를 줄인 결과를 설계구조 행렬을 이용해서 보이고자 한다. 제 2 절의 연구에서 우리는 다분야 설계문제는 순차 분해법을 통해 재배열됨을 알 수 있었다.

여기에 Rogers 가 적용한 항공기 설계 예제에 3 절에서 제시한 병렬 분해법을 적용하고자 한다. 전체 설계 분야들은 앞서 보인 Fig. 2 에 나타나 있고 이를 설계 구조행렬을 이용하여 보기 쉽게 나타내면 Fig. 3 과 같이 된다.

아래 Fig. 7 은 MDO 예제를 전체를 몇 개의 하 부 시스템으로 병렬 분해한 후의 결과를 나타내고 있다. 앞서 보인 Rogers 의 순차분해 결과와 비교해 보면 Rogers 는 일괄처리법을 위해 전체 프로세스의 피드백 연관을 줄인 결과를 얻었으나, 본 연구의 결과에서는 Fig. 7 과 같이 전체가 3 개의 하부시스템으로 나위고 하부 시스템내의 피드백 연관과 서브 시스템간의 연관이 분해되기 전인 Fig. 3 과 비교볼 때 많이 줄어들어 들었음을 알 수 있다. 결국 효과적인 병렬 분해법이 적용되었음을 알 수 있다.

여기서 주의 할 점은 하부시스템간의 연관들 중 각각의 중요도를 어떻게 판단할 것 인가하는 것이 되는데 이는 실제 시스템 해석에 있어서 해석시간을 늘리는 요인이 되는 상태변수를 많이 포함하고 있는 연관을 전체 시스템 해석 시간을 지배하는 연관으로 판단하면 된다. 따라서 우리는 병렬 분해시에 상태변수를 많이 포함하고 있는 연관은 되도록 이면 하부시스템 내부로 이동하게 하는 유전자 연산을 행하도록 해야 하는 것이다

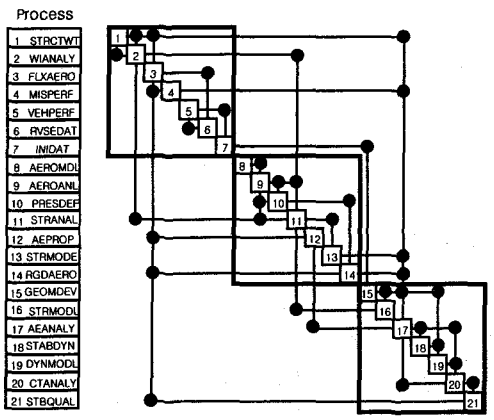


Fig. 7 Parallel decomposition result

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 다분야를 가지는 설계문제를

분해기반 병렬화 기법을 통해서 해석을 수행하고자할 때 필요한 병렬 분해법의 개발에 그 내용을 두고 있다. 현재 MDO 문제에 분산협동최적설계를 적용 하고자 할 때 전체 시스템을 효율적으로 분해한 방법론은 제시되어 있지 않다. 본 논문은 분산환경 하에서 MDO 가 수행될 때 선행되어야 하는 분해법에 대해 연구하였다. 병렬 처리의 효율을 얻기 위해선 다분야가 연관 되어있는 시스템을 어떻게 분해하느냐는 큰 문제가 된다. 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

MDO 문제에 분산협동최적설계를 적용하고자 할 때 MDO 문제를 구성하고 있는 전체 분야들은 사용 가능한 네트웍 컴퓨팅 환경에 따라 몇 개의 하부시스템으로 묶여 나누어져야 한다. 이는 또한 실제로 해석이 진행될 때 하부시스템내의 분야들 간의 연관과 하부시스템간의 연관이 해석시간에 미치는 영향을 동시에 고려하면서 분해되어야 한다. 즉 하부시스템 내에서는 순차 분해법의 이론을 바탕으로 반복연산을 야기하는 피드백 루프가 피드 포워드 루프로 바뀌어야 하며, 하부시스템간의 연관에서는 상태변수를 가장 많이 담고있는 연관이 해석시간을 길게 하는데 직접적인 영향을 끼친다는 점을 고려해야 한다. 4 절의 결과를 고찰해 볼 때 병렬 처리를 고려한 분해법이 순차분해법보다 분산협동설계를 위한 시스템 분해기법으로 적합함을 알 수있다.

본 연구에서는 MDO 문제에 협동최적설계를 적용하고자 할 때 선행 되어야 할 과제로 설계구조행렬과 유전자 연산을 이용하는 병렬분해법과 같은 분해 방법론을 제시하는 것으로 MDO 설계를 실제로 수행했을 때의 해석시간이나 그 효율에 관한 내용은 MDO 에 관한 보다 많은 연구가 이루어진 다음에 진행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적설계 신기술 연구센터의 연구비지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Kroo, I., Altus, S., Gage, P., and Sobieski, J., 1994, "Multidisciplinary Optimization Methods for Aircraft Preliminary Design," *AIAA-94-4325-CP, Proceedings of the 5th AIAA/NASA/USAF/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, pp. 697-707, Panama City, Florida, September.

(2) Sobieski, J., 1993, "Multidisciplinary Design Optimization An Emerging New Engineering Discipline," World Congress on Optimal Design of Structural Systems, Brazil.

(3) Stephen. M. B., Marc A. S., 1999, "Framework for Multidisciplinary Design Based on Response-Surface Approximations," Journal of Aircraft, Vol. 36, No 1, January-February, pp. 287-297.

(4) Sobieski, J., 1982, "A Linear Decomposition Method for Large Optimization Problems – Blueprint for Development", NASA TM 83248.

(5) Sobieski, J., 1988, "Optimization by Decomposition: a step from hierarchic to non-hierarchic systems," *Proc. Second NASA/Air Force Symposium on Recent Advances in Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Hampton, VA, 28-30 September.

(6) Rogers, J.L. and Barthelemy, J.-F. M., 1992, "Enhancements to the Design Manager's Aid for Intelligent Decomposition (DeMAID)," AIAA paper No. 92-4809.

(7) Rogers, J. L., and Bloebaum, C. L., 1994, "Ordering Design Tasks Based on Coupling Strength," AIAA paper No. 94-4362.

(8) Rogers, J. L., 1996, "DeMAID/GA an Enhanced Design Manager's Aid for Intelligent Decomposition," AIAA paper, NASA Langley Research Center.

(9) Rogers, J. L., 1989, "DeMAID – A Design Manager's Aid for Intelligent Decomposition User's Guide," NASA TM-101575.

(10) McCulley, C. M., and Bloebaum, C. L., 1994, "Optimal Sequencing for Complex Engineering Systems Using Genetic Algorithms," *Fifth AIAA/USAF/NASA/OAI Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Panama City, FL,.

(11) Mitsuo, G., Runwei, C., 1997, *Genetic Algorithms And Engineering Design*, John Wiley & Sons Books, Inc., New York, pp. 1-40.

(12) Altus, S. S., Kroo, I. M., and Gage, P. J., 1995, "A Genetic Algorithm for Scheduling and Decomposition of Multidisciplinary Design Problems," ASME paper 95-141.

(13) Wagner, T. C., 1993, "A General Decomposition Methodology for Optimal Systems Design," Doctoral Dissertation, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Michigan, Ann Arbor.

(14) H. A. Eschenauer, M. Grauer, 1999, "Decomposition and Parallelization strategies for solving large-scale MDO problems," *Advances in Design Automation*, Vol. 1, No. 1, pp. 24-43.

(15) Steward, D. V., 1981, Systems Analysis and Management, Structure, Strategy and Design, Petrocelli Books, Inc., New York.