

# 다목적 유전알고리즘을 이용한 시스템 분해 기법

박형욱\* · 김민수\*\* · 최동훈\*\*\*

## System Decomposition Technique using Multiple Objective Genetic Algorithm

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

**Key Words :** Multidisciplinary Design Optimization(다분야통합최적설계), Multi-Disciplinary Analysis Sub-System(다분야해석하부시스템), Design Structure Matrix(설계구조행렬), Collaborative Optimization(협동최적설계), Multiple Objective Genetic Algorithm(다목적 유전알고리즘)

### Abstract

The design cycle associated with large engineering systems requires an initial decomposition of the complex system into design processes which are coupled through the transference of output data. Some of these design processes may be grouped into iterative subcycles. In analyzing or optimizing such a coupled system, it is essential to determine the best order of the processes within these subcycles to reduce design cycle time and cost. This is accomplished by decomposing large multidisciplinary problems into several multidisciplinary analysis subsystems (MDASS) and processing it in parallel. This paper proposes new strategy for parallel decomposition of multidisciplinary problems to improve design efficiency by using the multiple objective genetic algorithm (MOGA), and a sample test case is presented to show the effects of optimizing the sequence with MOGA.

### 기호설명

- $d_i$  : 분야의 적합 구속조건
- $X^0$  : 시스템 단계의 목적변수
- $f_k$  : 전방연관(forward coupling)
- $b_k$  : 후방연관(backward coupling)
- $c_u$  : 상부연관(upper coupling)
- $c_l$  : 하부연관(lower coupling)
- $p_i^j$  : i 번째 하부시스템내의 j 번째 분야
- $N_t$  : 전체 분야 개수
- $F$  : 전체 하부시스템 개수

### 1. 서론

많은 공학 시스템은 다양한 데이터의 입출력 관계들이 서로 연관(coupling)된 형태로 모델링된다. 이러한 예로는 구조해석, 유동해석, 동역학해석 등의 다분야를 동시에 고려해야 하는 경우나 자동차, 항공기의 설계절차 등에서 쉽게 발견된다. 이러한 다분야통합설계문제에서 다양한 설계조건과 복잡한 설계절차를 고려한 설계해의 최적화가 중요한 문제로 대두되고 있다.

이러한 다분야통합최적설계 (Multidisciplinary Design Optimization, MDO)<sup>(1,2,3)</sup>기법은 설계의 효율성이나 비용을 고려할 때 기존 설계방법에 비해 많은 이점을 가지는 것으로 알려져 있다. 그러나 여러 분야가 복잡하게 연관되어 있는 경우에 이를 어떠한 설계절차를 거치는 몇 개의 다분야해석하부시스템(Multi-Disciplinary Analysis Sub-System,

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

E-mail: babytigers@popmail.com

TEL: (02)2290-0478 FAX: (02)2290-1639

\*\* 회원, 한양대학교, BK21 기계분야 계약교수

\*\*\* 회원, 한양대학교, 최적설계신기술연구센터 소장

MDASS)으로 분해하여야 다분야통합최적설계 방법론에 적합한가에 대한 문제가 있으며 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.(4-16)

이에 대한 연구로 Rogers<sup>(4,5,6,7)</sup>는 전체시스템을 구성하는 여러 분야간의 연관관계를 설계구조행렬 (Design Structure Matrix, DSM)로 구성된 후 시스템 내의 후방연관을 유전알고리즘을 이용하여 최소화 하였다. 이에 반해 Mitsuo<sup>(8)</sup>와 Altus<sup>(9)</sup>는 다분야 설계문제를 스케줄링함과 동시에 병렬처리를 위해 전체 시스템을 몇 개의 하부시스템으로 나누고자 하였으나 설계자의 경험에 의한 분류라는 한계가 있었다. Park 은 이러한 한계를 극복한 자동화된 병렬처리기반 분해기법을 제안하였다.<sup>(10)</sup>

이와 같은 Rogers, Altus, Park 의 연구는 시스템의 설계절차에 대한 해를 하나만 제시하는 특성이 있다. 그러나 설계절차의 효율성을 판별하는 기준이 여러 가지이므로 다목적 최적화문제의 특성상 최적의 설계절차는 파레토 집합의 형태로 나오게 된다. 본 논문에서는 Park 의 연구에 기반으로 하여 다분야통합최적설계방법론을 적용할 수 있는 최적의 설계절차를 나타내는 파레토 집합을 구하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 Park 이 사용한 유전알고리즘의 적합도 함수를 다목적 유전알고리즘에 맞도록 변경하였다.

## 2. 시스템 분해기법

### 2.1 순차분해법

설계구조행렬은 Steward<sup>(11)</sup>에 의해 개발된 표기법으로 설계 분야간의 연관관계를 행렬을 이용하여 나타낸 것으로서 행렬요소의 값은  $DSM(i, j)$ 와 같이 나타낸다. 즉,  $DSM(i, j)$ 의 값은 설계구조행렬 상에서  $i$  번째 분야의 해석결과가  $j$  번째분야의 입력값으로 주어지면 1을 가지며, 그렇지 않은 경우에는 0으로 주어진다(Fig. 1).

순차분해법은 이와 같이 표현된 설계구조행렬에서 반복연산을 유발하는 후방연관( $C_L$ )을 줄이기 위하여 분야들의 순서를 재배열하는 방법으로서 Rogers, Altus 등이 유전알고리즘을 이용하여 구현하였다. 그러나 다분야통합최적설계의 관점에서 볼 때 Rogers 가 적용한 순차분해법은 전체 시스템을 몇 개의 하부시스템으로 분해하지 않고 설계구조행렬의 후방연관을 줄이는데 주력하였기 때문에 병렬처리에 의한 효율향상을 기대할 수 없다. 따라서 전체 시스템을 몇 개의 하부시스템으로 나누는 새로운 분해방법이 제안되었다.

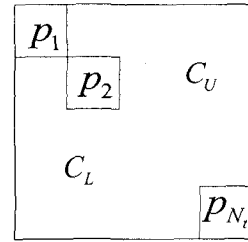


Fig. 1 DSM of system

### 2.2 병렬분해법

병렬분해법에서는 전체 시스템을 몇 개의 하부시스템으로 나누고 반복연산을 유발하여 계산시간을 증가시키는 요소를 하부시스템 내의 후방연관에 의한 요인과 하부시스템 간의 연관에 의한 요인으로 나누어 유전자 알고리즘의 적합도 함수에 적용하였다.

Fig. 2 는  $N_i$  개의 세부 분야로 이루어진 전체 시스템을  $F$  개의 하부시스템으로 분해하고자 할 때의 설계구조행렬을 나타내고 있다.

$$f_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m DSM(i, j) \quad (1)$$

$$b_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m DSM(i, j)(i - j) \quad (2)$$

$$c_u = \sum_{i=1}^{N_i-1} \sum_{j=2}^{N_i} DSM(i, j) - \sum_{k=1}^N f_k \quad (3)$$

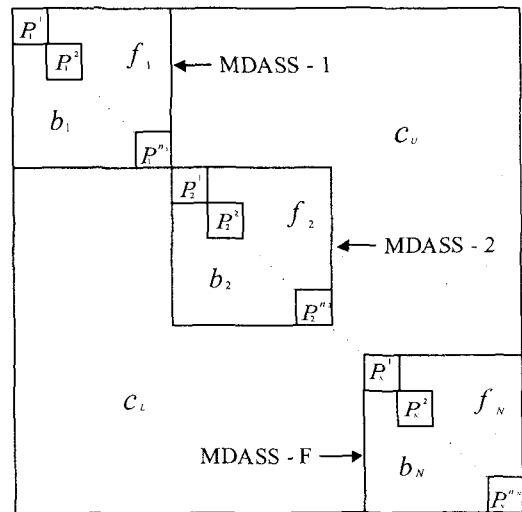


Fig. 2 DSM of decomposed system for parallel processing

$$c_L = \sum_{i=2}^{N_i-1} \sum_{j=1}^{N_i} \text{DSM}(i, j) - \sum_{k=1}^N \left[ \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^{u-1} \text{DSM}(i, j) \right] \quad (4)$$

$$l = \sum_{p=0}^{k-1} n_p + 1, u = \sum_{p=1}^k n_p, N_t = \sum_{p=0}^N n_p, n_0 = 0 \quad (5)$$

식 (1)은 하부시스템 내부의 전방연관에 해당되는 항으로서 하부시스템의 해석에 소요되는 시간에 영향을 미치지 않는 항이다. 식 (2)는 하부시스템 내부의 후방연관과 관련된 항으로서 하부시스템의 해석에 소요되는 계산시간을 증가시키는 항이다. 하부시스템 내의 후방연관 중 상대적으로 멀리 떨어진 분야들간의 연관은 서로 인접해있는 후방연관에 비하여 해석시간이 더 많이 소요되므로 이러한 점을 고려해 주기 위해 거리인자 (i-j)를 곱하였다. 식 (3)과 식 (4)는 하부시스템 간의 상부연관과 하부연관을 나타내고 있다.

다음 장에서는 병렬분해법을 설계절차의 파레토 최적해를 구하는 유전알고리즘에 대하여 설명하겠다.

### 3. 다목적 유전알고리즘

본 연구에 이용된 유전알고리즘은 각 분야를 유전자라 가정하고 이들의 집합체인 전체 분야들을 염색체로 가정하여 조합최적화를 수행하는 순열 기반 유전알고리즘(permutation based genetic algorithms)이다. 이러한 유전알고리즘의 연산을 통해 목적함수의 값이 최소화되도록 교배연산과 변이연산을 수행하여 Fig. 2 와 같은 구조의 설계구조행렬을 만들어낸다. 여기서 다목적 유전알고리즘을 위한 기법은 Goldberg<sup>(17,18)</sup>가 제안한 파레토 유전알고리즘(Pareto Genetic: PGA)을 사용하였는데 이 방법은 개체의 우수성에 따라 순위를 부여하고 동일한 순위에 속하는 개체는 동일한 적응도를 갖는다고 가정하는 방법이다. 순위를 구하는 절차는 다음과 같다.

먼저 모집단 내의 모든 개체에 대해 지배여부를 조사하여 파레토최적해(비지배해)들에 순위 1을 부여하고 이들을 모집단에서 제거한다. 다시 새로운 모집단 내의 개체들에 대해 지배여부를 조사하여 파레토최적해(비지배해)에 순위 2를 부여하고 이들을 모집단에서 제거한다. 모든 개체에 순위가 부여될 때까지 이와 같은 과정을 반복한다.

Fig. 3은 9개 개체에 파레토 유전알고리즘을 적용하여 순위를 부여한 예이다. 먼저 개체 A~D는 파레토최적해이므로 순위 1이 된다. 이들을 모집

단에서 제거하면 새 모집단은 E~J가 되며, 이 모집단에서는 E, F, G가 파레토최적해이고 순위 2가 된다.

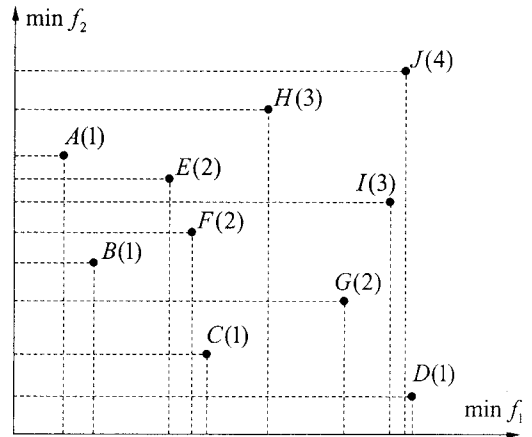


Fig. 3 Ranking of chromosomes

이와 같은 파레토 유전알고리즘을 적용하기 위하여 본 논문에서는 하부시스템 내의 후방연관과 관련된 목적함수와 하부시스템 간의 연관과 관련된 목적함수를 고려하였다.

식 (6)은 첫번째 목적함수로서 k 개의 하부시스템 중에서 후방연관의 개수가 가장 많은 값을 나타낸다.

$$f_1 = \max(b_k) \quad (6)$$

식 (7)는 두번째 목적함수로서 하부시스템 간의 연관을 구성하는 상부연관과 하부연관 중에서 큰 값을 나타낸다.

$$f_2 = \max(c_U, c_L) \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7) 모두 연관관계가 줄어드는 것이 우수한 시스템 분해 결과이므로 최소화되도록 수식화 하여 다목적 유전알고리즘을 수행하였다.

### 4. 다목적 유전알고리즘을 이용한 병렬 분해법의 적용 예

본 장에서는 2 장의 병렬분해법과 3 장의 다목적 유전알고리즘을 이용하여 여러 절차를 거치는 설계문제를 적절히 분해한 예를 보이고자 한다.

4.1 절에서는 항공기 설계의 작업흐름을 병렬분

해법에 의하여 재구성 하였으며 4.2 절에서는 Collville 의 화학반응장치 최적화문제를 병렬분해 하였다.

#### 4.1 항공기 설계의 작업흐름에 대한 병렬분해

이 절에서는 Rogers 가 적용한 항공기 설계 예제에 다목적 유전알고리즘을 이용한 병렬분해법을 적용하고자 한다. 전체 설계 분야들은 Fig. 4 에 나타낸 바와 같고 이를 설계구조행렬로 표현하면 Fig. 5 와 같다. 이러한 설계구조행렬을 제안된 다목적 유전알고리즘을 이용한 병렬분해법으로 분해하면 ???개의 파레토최적해를 얻을 수 있다.

Fig. 6 은 파레토최적해 중에서 하나를 나타내고 있으며, Table 1 은 각 파레토최적해의 연관관계를 가지는 인자의 개수를 나타내고 있다.

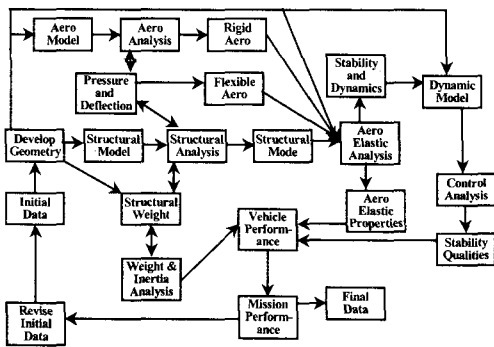


Fig. 4 Example of design process for MDO problem

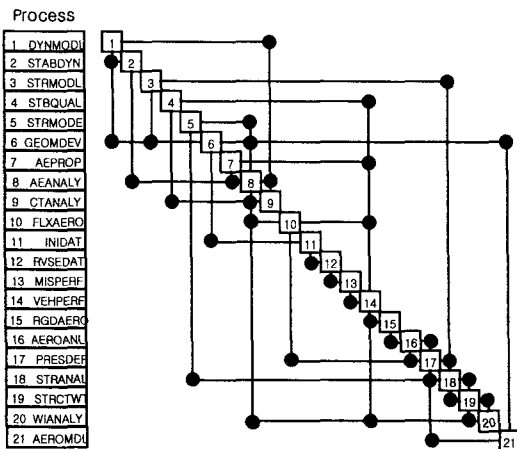


Fig. 5 Unsequenced DSM for sample MDO problem

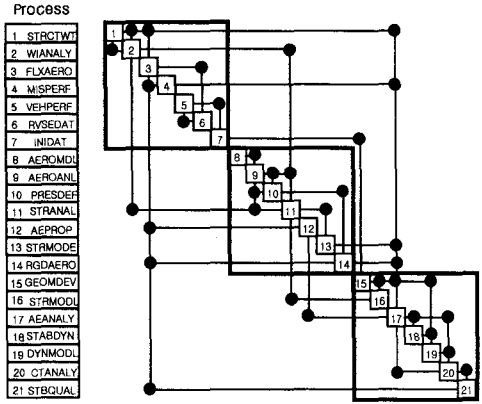


Fig. 6 Result of parallel decomposition for airplane design process

Table 1 Result of parallel decomposition for airplane design process

$w_1$	$w_2$	Total feedback coupling	Total MDASS coupling
0.1	0.9	9	12
0.2	0.8	9	12
0.3	0.7	9	12
0.4	0.6	8	12
0.5	0.5	7	12
0.6	0.4	5	14
0.7	0.3	3	16
0.8	0.2	2	16
0.9	0.1	0	22

Table 1 에서 해석에 소요되는 계산시간에 많은 영향을 미치는 하부시스템 내부의 후방연관과 최적화 과정에서 소요되는 계산시간에 많은 영향을 미치는 하부시스템 간의 연관의 가중치에 따라 적합한 설계구조행렬을 선택하여 다분야통합최적설계를 수행하기 위한 시스템의 구조로 사용한다.

설계구조행렬 선택시 해석을 위한 반복연산과정을 최적화과정을 위한 반복연산이 포함하고 있으므로 하부시스템 내부의 후방연관관계에 대한 중요도를 중시하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 Colville 의 화학반응장치 설계흐름의 병렬분해 및 분산협동최적설계

Fig. 7 은 1968 년에 Colville 이 검증용 예제로 사용하였던 화학반응장치 문제<sup>(19)</sup>이다. 설계변수와

상태변수 그리고 최적설계 문제는 다음과 같다.

설계변수의 정의

- $x_1$  = Olefin Feed Rate, bpd
- $x_2$  = Isobutane Recycle Rate, bpd
- $x_3$  = Fresh Acid Addition Rate, Mbpd

상태변수의 정의

- $y_1$  = profit, \$/day  
 $= 0.063y_2y_5 - 5.04x_1 - 3.36y_3 - 0.035x_2 - 10.0x_3$
- $y_2$  = Alkylate Product Rate, bpd  
 $= x_2(112 + 13.167y_6 - 0.6667y_6^2)/100$
- $y_3$  = Make-Up Isobutane Rate, bpd  
 $= 1.22y_2 - x_1$
- $y_4$  = Spent Acid Strength, wt%  
 $= 98000x_3 / (y_2y_7 + 1000x_3)$
- $y_5$  = Motor Octane Number  
 $= 86.35 + 1.098y_6 - 0.038y_6^2 + 0.325(y_4 - 89)$
- $y_6$  = External Isobutane to Olefin Ratio  
 $= (x_2 + y_3) / x_1$
- $y_7$  = Acid Dilution factor, ADF  
 $= 35.82 - 0.222y_8$
- $y_8$  = F-4 Performance No. @4.6cc Tel/gal.  
 $= -133 + 3y_3$

최적설계문제 정식화

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } y_1 \\
 & \text{Subject to } 0 \leq y_2 \leq 5000 \\
 & \quad \quad 0 \leq y_3 \leq 2000 \\
 & \quad \quad 85 \leq y_4 \leq 93 \\
 & \quad \quad 90 \leq y_5 \leq 95 \\
 & \quad \quad 3 \leq y_6 \leq 12 \\
 & \quad \quad 0.01 \leq y_7 \leq 4 \\
 & \quad \quad 145 \leq y_8 \leq 162 \\
 & \quad \quad 0 \leq x_1 \leq 2000 \\
 & \quad \quad 0 \leq x_2 \leq 16000 \\
 & \quad \quad 0 \leq x_3 \leq 120
 \end{aligned}$$

(8)

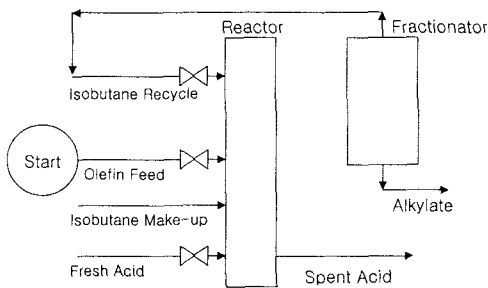


Fig. 7 Simplified flow diagram of an alkylation unit

위의 상태변수 식을 설계구조행렬로 나타내면 Fig. 8 의 (a)와 같으며 이를 2 개의 하부시스템을 가지는 구조로 병렬 분해하면 Fig. 8 의 (b)와 같다.

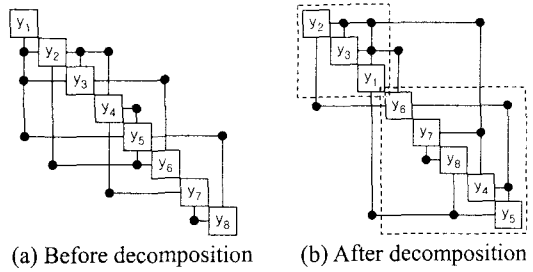


Fig. 8 Parallel decomposition of alkylation unit process

Table 2 Result of parallel decomposition for alkylation unit process

$w_1$	$w_2$	Total feedback coupling	Total MDASS coupling
0.1	0.9	3	4
0.2	0.8	3	4
0.3	0.7	2	4
0.4	0.6	2	4
0.5	0.5	1	5
0.6	0.4	1	5
0.7	0.3	0	6
0.8	0.2	0	6
0.9	0.1	0	6

## 5. 결론

현재 MDO 문제에 다분야통합최적화 방법론을 적용하고자 할 때 전체 시스템을 효율적으로 분해하는 방법론이 Park 에 의해 제시되어 있다. 그러나 병렬분해기법의 문제 특성상 최적의 설계절차는 파레토 집합의 형태로 나오게 되지만 기존 방법은 이중에서 하나만을 설계자에게 제시하여 선택의 폭을 좁게 하는 문제점이 있었다.

본 논문에서는 여러 분야가 복잡하게 연관되어 있는 설계문제를 몇 개의 하부시스템으로 분해하는 기법을 제시하였다. 이 기법으로 시스템을 분해하면 다분야통합최적설계기법을 적용하였을 때 최적의 수행성능을 보일 수 있는 설계절차를 파레토 집합의 형태로 설계자에게 제시하여 준다. 이

를 위하여 기존 방법과는 다르게 목적함수를 하부 시스템 내부의 후방연관과 관련된 목적함수와 하부시스템 사이의 연관과 관련된 목적함수로 분리하였다. 그리고 기존방법은 적합도를 높인다는 의미에서 최대화 문제로 수식화 되었으나, 연관관계가 작아져야 하는 문제의 특성과 일치되도록 최소화 형태로 변경하였다.

이러한 병렬분해기법에 의하여 구한 설계절차로 직접 MDO 설계를 수행하였을 때의 해석시간이나 그 효율에 관한 연구도 병렬분해기법에 대한 연구와 병행되어야 할 것으로 사료된다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 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 5<sup>th</sup> 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) 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*.
- (5) Rogers, J. L., and Bloebaum, C. L., 1994, "Ordering Design Tasks Based on Coupling Strength," *AIAA paper No. 94-4362*.
- (6) Rogers, J. L., 1996, "DeMAID/GA an Enhanced Design Manager's Aid for Intelligent Decomposition," *AIAA paper*, NASA Langley Research Center.
- (7) Rogers, J. L., 1989, "DeMAID - A Design Manager's Aid for Intelligent Decomposition User's Guide," *NASA TM-101575*.
- (8) Mitsuo, G., Runwei, C., 1997, *Genetic Algorithms And Engineering Design*, John Wiley & Sons Books, Inc., New York, pp. 1-40.
- (9) 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*.
- (10) 박형욱, 김성찬, 김민수, 최동훈, 2001, "효율적 분산협동최적설계를 위한 병렬처리기반 분해 기법," *대한기계학회논문집 A 권*, 제 25 권 제 5 호
- (11) Steward, D. V., 1981, *Systems Analysis and Management, Structure, Strategy and Design*, Petrocelli Books, Inc., New York.
- (12) Sobieski, J., 1982, "A Linear Decomposition Method for Large Optimization Problems - Blueprint for Development", *NASA TM 83248*.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) Goldberg, D.E. 1997, *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison Wesley, pp. 197-201.
- (18) Zbigniew Michalewicz, 1992, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer, pp. 171-177.
- (19) Colville, A.R., "A Comparative Study on Nonlinear Programming Codes," *IBN New York Scientific Center Report No. 320-2949*, June, Test Problem #8 (pg. 32), IBM Corporation, Philadelphia Scientific Center, Philadelphia, PA.