

# 다목적 Evolutionary Optimization 방법을 이용한 Compressor Station 최적화

류현욱, 신동일, 윤인섭  
서울대학교 응용화학부

## Compressor Station Optimization Using an Evolutionary Multiobjective Optimization System

Hyunuk Ryu, Dongil Shin and En Sup Yoon  
School of Chemical Engineering, Seoul National University

### 1. 서론

가스 transmission 시스템을 비롯한 파이프라인 네트워크의 최적화 [1, 3, 13], 가스 turbine engine 최적화 [8], compressor station의 최적화 [5], gas well production의 최적화 등 가스산업에서의 최적화에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 최적화 방법은 크게 미분에 의한 방법과 무작위 탐색으로 나눌 수 있는데, 주로 미분에 의한 방법이 많이 이용되어 왔다. 이러한 최적화 방법은 단일 목적함수 중에서 전역해를 구하는데 그 초점이 맞추어져 있고 지난 수십년간 수리계획법에 기반한 최적화 방법이 매우 향상되어 왔지만 문제 자체에 비선형성이 존재할 때는 전역해를 구하는 것이 대단히 힘들었다. 이는 미분을 이용한 방법이 본질적으로 초기조건에 영향을 많이 받기 때문이다 [2].

이에 대해 자연선택과 유전학의 mechanism에 기초한 탐색기법인 genetic algorithm (GA)은 다음과 같은 장점을 지니고 있다 [2, 6, 7, 9, 10]. 첫째, 함수 값 자체만을 이용하고 여러 형태의 변수들을 동시에 처리해줄 수 있으므로 문제의 형태에 관계없이 매우 다양한 문제에 적용시킬 수 있다. 둘째, 무작위로 발생된 초기 개체군을 이용하므로 해의 초기치에 비교적 민감하지 않다. 셋째, 초기치에 덜 민감한 결과의 하나로 전역해에 도달할 가능성이 크다. 넷째, 개체군을 이용하기 때문에 여러 국지해에 동시에 수렴하는 것이 가능하다. 이러한 특성으로 Goldberg [9]에 의해 초창기부터 가스산업과 관련된 최적화에 이용되어 왔다.

다목적함수 최적화는 예를 들어 오염물질을 제거하여 좋은 환경을 만들고자할 때 단순히 배출되는 모든 물질들을 제거하는 것처럼 문제가 단순화되지 않고 상충되는 여러 인자들의 적절한 trade off를 통해 최적의 해를 얻으려는 경우 발생한다. 즉, 물리적인 요인, 화학적인 요인, 생물학적 요인, 경제적 요인, 사회적 요인 등등의 다목적들을 고려한 최적의 해를 찾게된다 [12]. Compressor station의 최적화에 있어서도 단순히 에너지 소비를 줄이는 것에 목적을 두지 않고 환경문제나 제어성, 공정의 조작성 및 안정성 등을 고려할 때 이는 다목적함수의 최적화 문제가 된다. 본 연구에서는 가스산업의 경쟁체제가 심화됨에 따라 더욱 필요시 되리라 예측되는 가스산업관련 최적화 시스템을 개발하기 위해 기존의 단일 목적함수 최적화와 아울러 다목적 함수의 최적화도 가능하게 하는 최적화시스템을 evolutionary 방법을 이용하여 구축하고자 하였다.

## 2. 다목적함수 최적화를 위한 Evolutionary Algorithm

Gas turbine engine 최적화 [8], 반응기 최적화 [4], 석유화학산업의 해석 [14] 등에서 다목적함수 최적화 방법을 빌어 문제 해결을 꾀한 예가 있는데, 일반적으로 다목적 함수의 최적화문제는 다음과 같이 표현된다 [2, 9, 13]:

$$\begin{aligned} & \text{Find } \mathbf{x} \\ & \text{such that minimizing } f(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})) \\ & \text{subject to } g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

단일 목적함수 최적화 문제에서는 최적이라고 하는 것에 별다른 설명이 필요치 않다. 단순히 가장 좋은 것을 찾는 것이다. 그러나 다목적함수의 최적화 문제에서는 최적이라는 것이 분명치 않다. 만일 우리가 여러 개의 목적함수 값을 서로 관계 지어 단일 목적함수를 생성하지 않는다면, 최적에 대한 다른 정의가 필요하게 된다. 이럴 때 사용되는 것이 Pareto 최적조건이다. 그리고 이러한 최적조건을 적용시키게 되면 최적해는 하나의 해가 아니라 다수의 최적해 집합(Pareto optimal set)으로 나타난다. 그럼 Pareto 최적성의 정의를 살펴보자. 수학적으로  $(\mathbf{x} \prec_p \mathbf{y}) \Leftrightarrow (\forall i)(x_i \leq y_i) \wedge (\exists i)(x_i < y_i)$  이면 벡터  $\mathbf{x}$ 가 또 다른 벡터  $\mathbf{y}$ 보다 부분적으로 작다고 말한다. 이럴 때  $\mathbf{x}$  dominates  $\mathbf{y}$  라는 표현을 쓴다.

어떤 다른 점들에 의해서 dominated되는 점이 없을 때, nondominated 또는 noninferior하다고 말한다. 이러한 점들을 Pareto 최적해 집합이라 한다. 이것을 말로 풀어쓰면 “설계 가능영역의 설계점들 중 적어도 하나의 목적함수의 증가가 없기 전에는 다른 하나의 목적함수의 감소가 가능하지 않은 최적점들의 집합, 다시 말하면 설계가능영역의 점들 중 어떠한 설계점에 대해 적어도 하나의 목적함수를 감소시키고 다른 개체의 목적함수를 감소시키거나 같게 하는 다른 설계점이 존재하지 않을 때 그 점들의 집합을 Pareto 최적해 집합이라 한다”와 같다.

본 연구에서는 Pareto 최적해 집합을 구하기 위해서 simple genetic algorithm의 선택법과 세대교체법을 변형하였다. 선택부분에서는 tournament 선택을 먼저 수행한 후 필요하다면 공유(Sharing)를 수행한다:

- Pareto domination tournaments: 이 방법은 우선 두 개의 후보자를 고른 후에 그 두 후보를 비교대상 집합과 비교를 한다. 2개 모두 dominated되어 있으면 임의로 하나를 선택하고, 2개 중 하나만이 nondominated하다면 nondominated한 것을 선택한다. 만일 둘 다 nondominated하다면 이때는 sharing (on the non-dominated frontier)을 해주게 된다. 여기서 이런 선택방법을 이용하는 이유는 선택 시에 Pareto 최적 조건을 만족하는 것들을 우선적으로 선택을 하자는 것이다. 그런데 문제점은 이런 식으로만 선택을 하게 되면, 하나의 점으로 수렴한다는 것이다. 이것을 방지하고자 공유 (sharing)를 하는 것이다 [7].

- Sharing on the nondominated frontier: 공유란 강제로 분배를 해주는 것이다. 다시 말해서 아주 뛰어난 것들이 많이 있더라도 뛰어난 것만을 선택하지는 않겠다는 의미이다. 여기서도 공유를 하게 되는데 그 목적은 한 점으로 수렴하는 것을 막기 위해서이다. 두

후보자가 둘 다 nondominated하다면 그 점들을 중심으로 해서 일정 거리에 있는 점들의 수를 계산한다 (이러한 작업은 탐색집합 (niche)들을 형성하게 된다). 그리고 나서 한 점으로의 이끌림을 막기 위해서 그 수가 적은 쪽을 선택한다 [7].

시스템에 적용한 세대교체 전략은 ranking법을 이용한 연속적인 방법이다. 자세히 말하면, 자손이 생기자마자, 교체하려는 대상 집합을 Pareto 최적해 집합들로 ranking을 매긴다. 그리고 나서 가장 낮은 rank의 점들 중에서 임의로 세대교체를 시행한다. 이러한 세대교체법은 구속조건을 벌칙함수로 처리할 수 있도록 해준다. 이런 방법들을 적용하여 새로운 알고리즘을 그림 3에 제안하였다. 개발되어진 시스템은 multistage pipeline 최적화문제 그리고 가스 compressor 최적화에 성공적으로 응용되었는데 본 논문에서는 가스 compressor 최적화에 대해서만 기술하기로 하겠다.

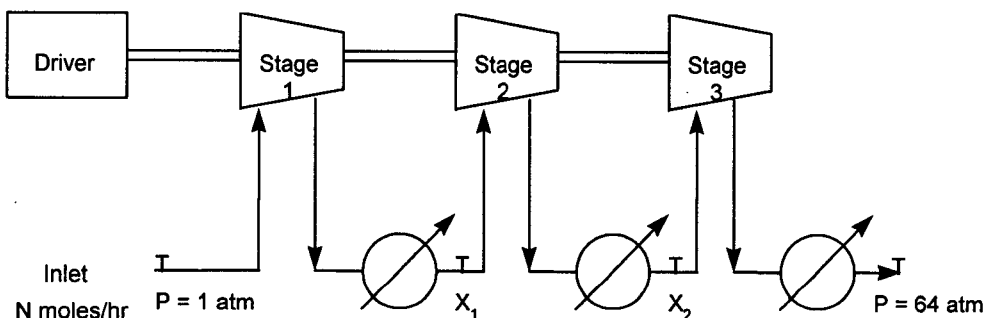


그림 1 Multistage compressor schematic.

### 3. Multistage Compressor Optimization

대륙횡단 파이프라인 네트워크를 통해 천연가스를 수송하기 위한 compressor station은 대략 일일 수백만  $ft^3$ 의 연료를 사용하여 운전된다. 따라서 이런 compressor station의 효율적인 설계와 운전은 공기중으로의 방출을 줄임과 동시에 안전성을 향상시키고 상당한 운전비용을 감소시킬 수 있다.

참고문헌 [11]에 자세히 설명되어 있는 그림 1의 multistage compressor 최적화 문제에 대해 에너지 소비를 최소화시키는 각단 사이의 압력을 개발된 최적화 시스템을 사용하여 구한 결과 문헌치에 정확하게 수렴하는 결과를 얻을 수 있었다. 이때 사용된 변수값들은 표 1과 같고 그림 2와 같이 세대에 따라 total fitness가 변화함을 볼 수 있었다.

### 4. 결론

개발된 evolutionary optimization에 기반한 최적화도구는 pipeline network의 최적화를 비롯하여 가스산업에서의 다양한 최적화 문제 해결을 위해 유용하게 쓰여질 수 있을 것으로 예측된다. 본 연구에서는 기초단계로 향후 대륙횡단 파이프 네트워크의 건설시 에너지 소비를 최소화하기 위해 필요로 될 compressor station의 최적화에 시스템을 적용하여 그 유용성을 확인하였다. 기본적으로 병렬연산의 특성을 갖는 evolutionary algorithm을

parallel computing 방법을 이용하여 확장 구축하려 하고 있으며 이는 큰 계산시간을 요하는 문제를 해결하기 위해 효과적으로 사용될 수 있으리라 생각된다. 아울러 simulated annealing, MLP 등 다른 최적화 기법들과의 비교 검토를 통해 구축된 시스템이 효과적인 최적화 문제의 영역을 정의하려 현재 연구가 계속되고 있다.

표 1 Parameters used for the multistage compressor optimization problem.

Population Size	Crossover Probability	Mutation Probability	Resolution Wanted	Random Seed
60	0.7	0.001	$10^{-7}$	501

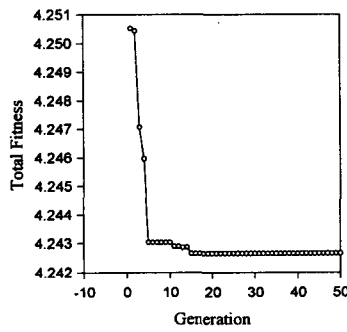


그림 2 Generation vs. total fitness.

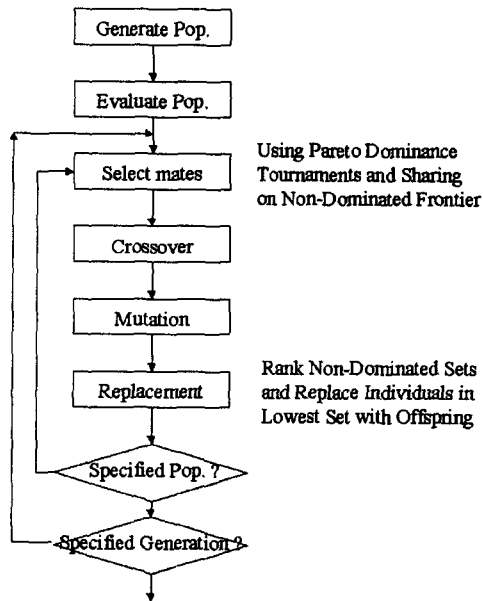


그림 3 Algorithm of the evolutionary multiobjective optimization method.

## 참고문헌

- [1] 성원모, 권오광, 이정환, 허대기, "파이프라인 네트워킹 최적화 모델의 개발 및 활용", *한국가스학회지*, 1(1), 56 (1997).
- [2] 이원보, 박성준, 윤인섭, "강화된 유전 알고리즘을 이용한 다극 및 다목적 최적화에 관한 연구", *한국가스학회지*, 1(1), 33 (1997).
- [3] Boyd, E. A. and Scott, L. R., Intelligent Pipeline Optimization Project, [<http://www.hpc.uh.edu/ipop/>].
- [4] Butala, D. N., Liang, W. R. and Choi, K. Y., "Multiobjective dynamic optimization of batch free radical polymerization process catalyzed by mixed initiator systems", *J. of Applied Polymer Science*, 44, 1759-1778 (1992).
- [5] Carter, R. G., "Compressor station optimization: Computational accuracy and speed", *Proceedings of the Pipeline Simulation Interest Group 1996 Annual Meeting*, San Francisco, CA, October (1996).
- [6] Fogel, D. B., "Evolutionary programming: an introduction and some current directions", *Statistics and Computing*, 4, 113-129 (1994).
- [7] Fonseca, C. M. and Fleming, P. J., "An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization", *Evolutionary Computation*, 3(1), 1-16 (1995).
- [8] Fonseca, C. M. and Fleming, P. J., "Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms—Part II: Application example", *IEEE Trans. in Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*,

28(1), 38 (1998).

- [9] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA (1989).
- [10] Goldberg, D. E., "A meditation on the application of genetic algorithms", *IlliGAL Report*, No. 98003, University of Illinois at Urbana-Champaign, February (1998).
- [11] Reklaitis, G. V., Ravindran, A. and Ragsdell, K. M., *Engineering Optimization: Methods and Applications*, Wiley, New York (1983).
- [12] Sawaragi, Y., Nakayama, H. and Tanino, T., *Theory of Multiobjective Optimization*, Academic Press, Orlando (1985).
- [13] Sekimjaki, E., "Practical Experiences with Various Optimization Techniques for Gas Transmission and Distribution Systems", *Proceedings of the Pipeline Simulation Interest Group 1996 Annual Meeting*, San Francisco, CA, October (1996).
- [14] Sophos, A., Rotstein, E. and Stephanopoulos, G., "Multiobjective analysis in modeling the petrochemical industry", *Chemical Engineering Science*, **35**, 2415-2426 (1980).