

## 열교환망 자동합성을 위한 새로운 방법

### A New Method for an Automated Synthesis of Heat Exchanger Networks

이 규 황, 김 민 석, 이 인 범, 고 흥 철  
(Kyu-Hwang Lee, Minseok Kim and In-Beum Lee and Hong Chul Ko)

**Abstract** : Among process synthesis problems, the heat exchanger network (HEN) has been subjected to the most concentrated effort because this kind of problems was well defined for solving it and 20-30% energy savings could be realized in the present chemical processes. In this paper, we use an evolutionary approach for HEN synthesis because this approach can overcome the local optimum and combine some heuristic rules. The basic evolutionary approach is composed of three parts, that is, initialization step, growth step and mutation step, as in the simulated annealing and genetic algorithm. This algorithm uses the ecological rule that a better cell will live and worse cell should decompose after repeated generations. With this basic concept, a new procedure is developed and a more efficient method is proposed to generate initial solutions. Its effectiveness is shown using test examples.

**Keywords** : heat exchanger network synthesis, evolutionary approach

#### I. 서론

지난 30여년간 화학 공정에서 체계적인 디자인, 즉 공정 합성은 많은 발전을 하였다. 특히 공정 합성 중에서 열교환망의 합성은 문제의 구성이 가장 확실하며, 실제 화학 공정에 도입이 되어 약 20~30%의 에너지 절감을 가져올 수 있기에 많은 연구가 진행이 되고 있다. 이 열교환망은 화학 공장의 규모가 커지면서 많은 설비들이 복잡하게 얽혀있고, 많은 에너지를 소모하게 되므로 생산 비용의 증가를 가져왔다. 특히 에너지 비용이 점차 증가하면서 에너지의 낭비를 줄이고, 에너지를 최대한 활용하기 위한 방편으로 열교환망을 합성하게 되었다. 열교환망은 냉각시켜야 하는 공정 흐름과 가열시켜야 하는 공정 흐름을 서로 연결하여 에너지 회수의 효과를 보면서 유틸리티 비용을 절감하자는 것이다. 이 열교환망에 대한 연구는 지난 수 십 년간 계속되면서 400여 편이 넘는 문헌들이 나오게 되었고, 실제 공정에서도 에너지 절감의 효과를 나타낼 수가 있었다. 그러나 대부분의 합성 문제가 그러하듯이 최적의 해를 구하는 것이 상당히 어렵기에 많은 연구로부터 다양한 접근 방법이 제시되고 있다. Hwa[1]가 처음으로 열교환망의 합성에 관한 개념을 제시한 것을 시작으로 하여 진행이 되어온 열교환망의 연구 방향은 크게 3가지로 분류가 가능하다. 첫째는 경험 법칙에 의한 합성 방법이고, 둘째는 수학적 모델화를 통한 방법이며, 셋째는 인공 지능에 기반을 둔 탐색 방법이다. 이를 컴퓨터의 계산 능력과 비교하여 보면 개인용 컴퓨터가 보급되기 이전에는 열교환망의 합성을 위하여 여러 가지 경험 법칙들이 개발되었다. 이는 복잡한 열교환망의 합성하기 위하여 (pinch technology)로 상당히 발전하게 되었다. 핀치 기술은 물리적 개념을 기반으로 하여 열교환망의 합성의 문제를 합

어 계산 능력에 크게 의존을 하지 않는 문제 해결 방법을 필요로 했기 때문이다. 이런 경험 법칙의 발전은 1980년대에 Linnhoff[2] 등에 의해 처음으로 도입이 된 핀치 기술성을 하기 전에 가장 간단하면서도 가장 쉽게 목표를 설정할 수가 있는 기술이다. 이와 같은 것이 가능한 것은 핀치 기술이 복잡한 공정을 물리적인 개념을 이용하여 합성하는 사람이 문제를 다룰 수가 있도록, 핀치 온도(pinch temperature)를 이용하여 여러 개의 작은 하부 문제로 나누어 주기 때문이다. 이를 통하여 합성하는 사람은 보다 쉽고, 다양한 그리고 공정 조건에 맞는 열교환망을 얻어낼 수가 있게 된다. 현재 이 기술은 열교환망의 합성 뿐만 아니라 압력 강하의 최적화(pressure drop optimization), 증류탑의 최적화(distillation column profile), 회분식 공정의 통합(batch process integration), 전 공장의 통합(total site integration) 그리고 오염 배출물의 최소화(emission targeting) 등의 다양한 공정에 응용이 되고 있다[3]. 그러나, 현재 이 기술은 목표의 설정을 할 수는 있으나 그 목표에 도달하는 방법에 대해서는 아직까지 연구가 미흡한 실정이며, 이로부터 구하여진 해는 최적 구조라는 것을 입증할 수가 없다는 단점도 있다.

한편으로 1980년대에 들어오면서 개인용 컴퓨터의 보급과 더불어 컴퓨터의 계산 능력은 비약적으로 발전을 하였다. 이로부터 수학적 지식의 기반을 토대로 열교환망의 합성에 있어서 가장 최적의 해를 얻고자 하는 시도가 생기게 되었다. Cerda와 Westerburg[4]는 열교환망의 합성에 있어서 목표값을 설정하는 데에 선형 계획법(LP)을 통한 이송 문제(transportation problem)로 정형화하였던 것을 시작으로 하여, Ciric와 Floudas[5], 그리고 Yee와 Grossmann[6]은 혼합 정수 선형 계획법(MILP)과 혼합 정수 비선형 계획법(MINLP)을 통하여 열교환망의 개조 및 보수에 관한 연구를 하였다. 이와 같은 수리적인 접근 방법들은 문제를 정형화한 후에 여러 가지 상용 최적화 도구를 활용하여 문제를 해결하고 있다. 여기서 문제를 풀 수만 있다면 최적 해를 보장할 수가 있다. 그러나 열교환망의 문제를 수학적 정형화를 하게 되면 상당히 많은 수의 변수가 생기게 되어 현재의 계산 능력으로는 문제를 풀기가 어렵다. 그리고 혼합 정수 비선형 계획법 등과 같은 문제에 대한 해법도 완전 하지

접수일자 : 1997. 10. 7., 수정완료 : 1998. 3. 6.  
이규황, 이인범 : 포항공과대학교 화학공학과  
김민석 : LG-EDS 시스템

고흥철 : LG-Caltex 정유 중앙기술연구원

※ 본 연구는 포항공과대학교 공정 산업의 지능 자동화 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 LG-Caltex 정유 주식회사를 통한 에너지지원 기술개발 지원센터의 에너지 절약기술 사업비에 의한 것입니다.

못한 실정이다. 그리고 이와 같은 방법에 있어서는 해에 대한 경우의 수를 간단하게 하기 위하여 만든 초구조(super-structure)의 형태에 따른 구조적 제약 때문에 구하여질 수 있는 해의 제한성도 문제가 된다.

또 다른 접근 방법은 인공 지능을 이용하는 것이다. 이 방법은 주로 진화적 접근 형태(evolutionary approach)를 취하고 있으며, 공정 합성에 있어서 많이 사용이 되고 있는 방법이 담금질 모사법(simulated annealing)과 유전 알고리즘(genetic algorithm)이다. 이런 방법이 최근에 들어서 주목을 받고 있는 이유는 컴퓨터의 계산 능력이 발전하면서 반복 계산에 의한 해의 탐색이 가능해졌고, 특히 수학적 탐색 방법보다 적은 계산 능력만으로도 현재도 충분히 다양한 문제를 풀 수가 있기 때문이다. 열교환망에 있어서 담금질 모사법을 사용하여 문제를 해결한 예를 찾아보면 Dolan, Cummings과 Le Van[7], Kirkpatrick 등[8]이 있고, Androulakis와 Venkatasubramanian[9]는 유전 알고리즘을 통하여 문제를 해결하고자 하였다. 또한, 수학적 접근 방법에서 문제가 복잡해지지 않게 단순화된 식들을 많이 사용하였던 것에 반하여, 이와 같은 접근 방법은 목적 함수의 값만을 이용하기에 복잡한 목적 함수의 사용이 가능하게 된다. 그리고 계산을 하기에 앞서 구조에 대한 제약을 줄 수가 있는 순차적인 문제의 해결이 가능하기에 보다 유연성이 있는 탐색 방법이라고 하겠다. 그러나, 이와 같은 방법은 여러 가지 경우에 대하여 반복 계산을 하여야 하기에 많은 계산 시간을 필요로 하게 된다. 물론 모든 구조를 전부 다 계산하지는 않으며 대략 모든 경우의 수에 비해 10%내외의 계산을 통하여 해를 구하게 된다.

일반적으로 담금질 모사법은 문제의 크기가 크고, 복잡한 조합형 최적화 문제(combinatorial optimization problem)에 대한 해법으로 좋은 결과를 보이고 있다. 담금질 모사법에서는 수학적 계획법에 의해 나타날 수가 있는 해의 지역성을 보완하여 최적해를 찾아가고자 하는 방법으로 확률적 판단을 사용하고 있다. 즉, 담금질 모사법에서 일반적으로 사용이 되고 있는 방법은 메트로폴리스 알고리즘(metropolis algorithm)이다. 이 방법은 시행 착오적 방법에 의해 얻어지는 각각의 해답을 물리적 계의 다른 분자 배열들로 보고, 목적 함수 값을 물리계의 다양한 에너지 상태식으로 생각하여 더 좋은 분자 배열 즉, 시행 착오적인 해답을 얻고자 하는 것이다. 이 방법에서는 주로 반복 계산 횟수가 증가하면서 적절하게 현재보다 나쁜 값으로 갈 확률을 줄여서 수렴을 시키는 것을 볼 수가 있다. 즉, 확률은 다음과 같이 정의가 되며, 에너지 변화가 크면 확률을 줄이며, 온도가 내려가면서 확률을 줄이게 된다.

$$P(\delta E) = \frac{\exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right]}{Z} \quad (1)$$

여기서 P는 확률이며, E는 함수값, k와 Z는 상수이고, T는 담금질 온도가 된다. 기존의 함수의 기울기를 이용하는 수학적 방법에서는 가장 좋은 방향으로만 탐색으로 하여 해가 더 좋아지지 않으면 해의 탐색을 멈추게 되어, 해의 탐색 과정에서 지역해에 머무르게 되는 단점을 가지게 된다. 그러나, 담금질 모사법은 탐색하는 과정에 있어서 현재의 값보다 나쁜 값이 나와도 문제의 특성상 적절한 확률적 판단에 의해 나쁜 방향으로도 탐색을 계속하는 것이다. 이렇게 하여 지역해에 도달하더라도 다른 점을 찾아갈 수가 있도록 하여 최적해를 찾을 수가 있다. 이를 통하여 접근한 방법을 살펴보면 초기 합성 구조를 임의로 준비한 후 초기 합성 구조에서 임의의 열교환기가 가지는 두 공정 호

를 중 하나를 다른 공정 흐름으로 바꾸거나 열 교환량을 조절하거나, 분기량을 조절하는 방법을 선택하여 그 변수를 조절하여 다음의 구조를 얻게 된다. 이 다음의 구조는 또 다른 해가 되며, 이의 목적 함수를 비교하여 다음의 계산을 반복하거나 멈추게 된다. 일반적으로 여기에는 이전의 여러 경험 법칙, 주로 핀치 기술(pinch technology)을 사용하여 최대 열 회수량(maximum energy recovery)을 유지하면서 전체 비용이 줄어드는 열교환망을 찾아가게 된다. 담금질 모사법에서는 주로 경험 법칙과 컴퓨터에 기반을 둔 최적화 알고리즘을 혼합하여 사용하는 것이 일반적이다.

유전 알고리즘의 경우에는 Androulakis와 Venkatasubramanian[9]에 의해 연구가 시작이 되어졌다. 유전 알고리즘은 생물학의 적자 생존의 원리를 도입하여 적절한 진화와 도태를 반복하여 최적해를 구하는 것이다. 즉, 유전 알고리즘은 문제를 풀기 위해 만들어진 개체의 집단 속에서 적자의 생존을 수행하며 매 세대마다 새로운 개체의 집단을 부모 집단의 유전자 재조합과 돌연변이에 의해 재생산하는 구조를 이루고 있다. 이러한 구조를 통하여 확률적인 기원의 결과로부터 기인하는 지역 탐색을 할 수가 있기 때문에 전통적인 최적화 알고리즘의 큰 단점 중의 하나인 지역 탐색을 극복할 수가 있다. 그러나 이는 단순한 무작위 탐색(random search)이 아니라 높은 성능 향상 확률을 가지고 탐색 공간의 새로운 영역을 탐험하기 위해 효과적으로 과거의 정보를 활용하게 된다.

열교환망에 있어서는 유전 알고리즘 보다는 담금질 모사법이 주로 쓰이고 있다. 이는 유전 알고리즘을 처음으로 만들 때부터 가지고 있던 제약 중에 하나가 이산 변수(discrete variables)를 기반으로 하였기에, 연속 변수와 이산 변수가 함께 존재하고 있는 열교환망의 합성에서는 다소 부적절하기 때문이다. 그러나, 담금질 모사법의 경우에는 구하여진 해가 지나치게 복잡하여 비논리적인 구조를 얻게 될 수도 있는 단점이 있다. 이를 통하여 접근한 방법을 살펴보면, 먼저 기본적인 초기 구조를 선정한다 다음 각각의 연결된 열교환기들을 유전 알고리즘에서 개체를 나타내는 매개변수 열로 만들어 탐색을 수행하게 된다. 둘 사이의 공통점은 초기 합성 구조를 임의로 선정하고 확률적인 탐색을 하게 된다.

이와 같은 세가지 방법들은 현재도 많은 연구가 되어지고 있으며, 보다 유연한 합성을 위하여 다중 핀치 개념(diverse pinch concept)[Rev와 Fonyo; 10], 최소 유동의 활용(the use of minimum flux)[Fraser; 11], 지역 분해 방법(block decomposition method)[Zhu 등; 12] 등의 다양한 시도가 계속되고 있다.

앞서서 제시되었던 다양한 방법들을 통하여 많은 연구가 되었지만 아직까지 부족한 부분에 대하여 Kravanja와 Glavic[13]은 첫째는 실제 공정에 있어서 공정 흐름(process stream)의 수가 10개 이상이 되는 경우에 문제를 해결하는 방법, 둘째는 실제로 복잡한 가격 관계 함수를 열교환망의 장치 비용으로 사용하여 최적화를 할 수가 있는 방법, 셋째는 지역 해를 피하기 위해 식의 비볼록성(nonconvexity)과 미분 불가능(nondifferentiability)을 극복하는 방법 등이 있다고 하였다. 본 연구에서는 위와 같은 것을 해결을 하고자 하여, 기존의 세가지 방법 중에서 인공 지능을 이용한 열교환망의 합성 방법을 연구하게 되었다. 그리고 기존의 인공 지능을 이용한 방법인 담금질 모사법의 시작 온도의 설정과 같은 사용자의 주관이 개입이 될 수가 있는 것을 피하고자 하였다. 이는 사전 지식이 없이 여러 번의 시행착오를 거쳐 적절한 해를 구할 수가 있는 인공 지능을 이용한 방법의 장

점을 충분히 활용하기 위해서 이다.

**II. 열교환망의 합성**

앞서서 언급하였던 인공 지능에 기반을 둔 최적화의 방법을 열교환망의 합성에 적용한 예는 여러 참고 문헌 [7][8][9]에 잘 나타나 있다. 그러나, 담금질 모사법이 가지는 가장 큰 단점은 문제의 해가 지나치게 복잡하게 나온다는 것이다. 이는 구조의 수식화로 인하여 문제가 가지고 있는 구조적 특성이 올바르게 고려가 되지 못하기 때문이다. 그리고 열교환망의 합성은 구조를 생각하면 이산 변수의 문제가 되고, 온도와 같은 공정 변수를 생각하면 연속 변수의 문제가 된다. 따라서 유전 알고리즘과 같이 이산 매개변수 열을 사용하여야 하는 경우는 각 공정 흐름에 대해 연속적인 열교환망의 합성을 하는 데에는 연속적인 정보를 이산화를 하여야 하는 단점이 있다. 그리고, 기존의 핀치 기술과 같은 경험 법칙에 의한 연구 방법들은 복잡한 문제를 단순화하기 위하여 많은 가정들을 도입하였다. 예를 들면, 초기에는 열전달 계수를 모든 경우에 하나의 값으로 가정하였던 것을 시작으로 하여, 열교환기의 가격 함수도 하나만 사용하기도 하였다. 그리고 열교환기의 가격을 예측을 하는 함수를 지극히 간단하게, 예를 들면 면적의 지수 승으로 나타나는 식으로 만들어 사용하기도 했다. 복잡한 문제에 대해서도 최소 접근 온도차를 몇 개만 선정하여 열교환망 합성의 주요 변수로 사용하기도 하였다. 물론, 최근에 들어서는 극복할 수 있는 여러 방법들이 도입이 되고 있지만 아직은 미숙하다고 하겠다.

따라서 본 연구에 있어서는 기존의 경험 법칙을 사용하여 열교환망을 합성하는 경우에 만들었던 여러 가정들의 도입을 최소한으로 줄이고자 한다. 그리고 담금질 모사법과 유전 알고리즘에서 지역 해를 극복하기 위해 도입하였던 확률적 탐색 방법들을 개념적으로 도입하여 사용한다.

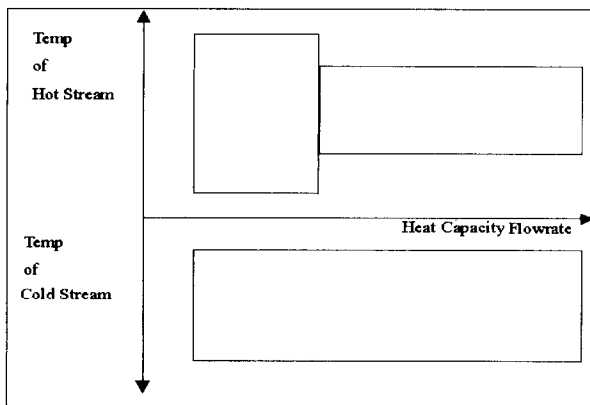


그림 1. 온도-열용량 흐름의 그림.  
Fig 1. Temperature and heat capacity flowrate diagram.

**1. 초기 씨앗의 형성(generation of initial seeds)**

일반적인 열교환망의 합성에서 주로 사용이 되는 격자 그림(grid diagram)을 그림 1과 같은 온도-열용량 흐름(temperature-heat capacity flowrate)으로 나타낼 수가 있다. 이는 격자 그림이 나오기 전에 주로 사용이 되던 열교환망의 합성 기법 중에 하나였다. 여기서 그림 2와 같이 초기 씨앗(initial seed)을 만들게 된다. 이는 먼저 공정 흐름(process stream)을 온류(hot stream)와 냉류(cold stream)에서 각각 하나씩 선택을 하고 온도와 열용량 흐름의 범위를 선택을 한다. 이 선택은 임의의 수(random number

generation)로 이루어진다. 예를 들면 온류 1을 선택하였다면, 온류 흐름의 온도 영역 중에서 100단위 온도(unit temperature)에서 99단위 온도까지의 구간을 선택하였고, 열용량 흐름은 0단위 열용량 흐름(unit heat capacity flowrate)에서 1단위 열용량 흐름까지 선택을 하였다면 이를 하나의 세포(cell)라고 부른다. 냉류에 대해서도 같은 방법으로 세포를 선택한다. 선택된 두 개의 세포가 하나의 열 교환기로 나타낼 수가 있으면, 즉 온류의 온도가 냉류의 온도보다 높고, 각 세포의 열량이 같으면 하나의 씨앗(seed)이라고 부른다. 이렇게 하여 적절한 수 만큼의 씨앗을 초기에 만들게 된다. 그림 2에서는 두 개의 씨앗을 만든 것을 예로 보인 것이다.

**2. 씨앗의 성장 과정(growth of the seeds)**

앞에서 선정된 여러 개의 초기 씨앗은 진화 과정을 반복하며 성장하게 된다. 그림 3에서 한 세포에 대하여 1, 2, 3, 4라고 번호가 붙여진 것과 같이 각 세포에 대하여 네 개의 방향으로 씨앗은 진화가 가능하다. 여기서 네 방향으로 탐색이 되는 범위는 기존의 씨앗이 가지고 있는 열량에 비례하여 정해지게 된다. 따라서 온류에서의 세포와 냉류에서의 세포에서 각각 4방향으로, 다시 말하면 총 16개의 방향으로 탐색을 한 후에 그 중에서 목적 함수가 가장 좋은 방향으로 진화를 하게 된다. 이것이 일반적인 진화 과정이다. 이 진화

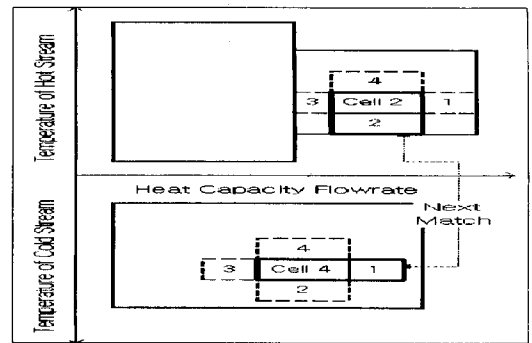


그림 2. 성장 방향의 결정.  
Fig. 2. Determination of the growth direction.

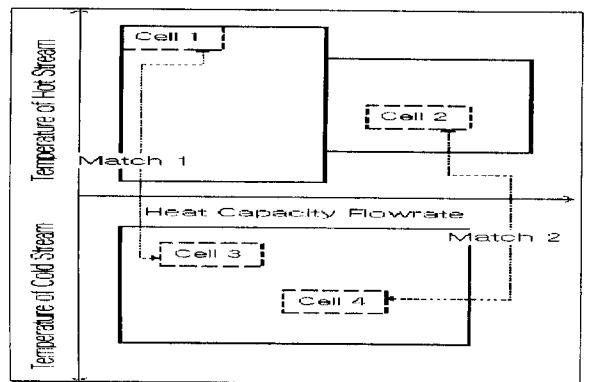


그림 3. 초기 씨앗의 생성.  
Fig. 3. Generation of initial seeds.

과정은 그림 3에서 굵은 선으로 그려진 방향으로 진화한 것을 볼 수가 있다. 물론 굵은 선 쪽으로 가는 것이 목적 함수가 가장 좋은 경우일 경우에 해당한다.

일반적인 진화 과정을 거치면서 다른 씨앗을 만나게 되는 경우가 생기기도 하는데, 이 경우에는 서로의 비교 대상

을 검토하여 그 중에 좋은 씨앗이 성장을 하고 나쁜 것은 퇴화를 하게 된다. 이 비교 대상은 목적 함수의 값이 될 수도 있으나 여기서는 목적 함수와 전체 교환되는 열량의 비로 하였다. 교환되는 양은 작음에도 불구하고 목적 함수의 값이 작은 경우와 교환되는 양은 많은 데 목적 함수의 값이 큰 경우에는 전자만이 성장을 하게 되어 있다. 이는 목적 함수의 값만을 비교하게 되면 교환되는 양의 영향을 파악할 수가 없기 때문이다. 따라서 교환되는 양이 많은 것, 다시 말하면 이미 많이 성장한 씨앗에 더 성장의 기회를 주자는 것이다. 이러한 비교 대상의 선정은 Zhu 등[12]에서 핀치 구간에 대한 블록화(block decomposition)를 하면서 도입한 면적의 증가분과 열량의 비를 최소화하였던 것과 유사하다고 하였다.

일정 수준의 성장을 한 씨앗은 씨앗 자체의 최소 접근 온도차가 지나치게 작아지거나, 다른 씨앗보다 목적 함수와 교환 열량의 비가 크기 때문에 더 이상의 진화를 하지 못하는 경우가 생기게 된다. 이러한 상태를 진화의 정체기라고 판단하여 이 경우에는 앞에서 말한 일반적인 진화 과정이 아닌 다른 성장 방법을 필요로 하게 된다. 따라서 목적 함수의 값이 줄어 들 수 있도록 유류의 세포와 냉류의 세포를 각각 특정한 온도만큼 온도 축을 따라 이동시키는 진화를 하게 된다. 이를 이차 진화라고 한다.

이 두 가지 진화 방법에 의해서 초기 씨앗부터 진화를 하게 되면 적자 생존의 원칙으로 좋은 몇 개의 씨앗만이 남게 되며, 이 몇 개의 씨앗으로 기본적인 구조를 구성하게 된다.

3. 돌연변이(mutation)

앞서 설명한 진화 과정은, 전통적인 최적화 기법에서와 같이, 지역해(local solution)를 탐색하는 데에 그치게 되는 단점을 가지게 된다. 따라서 최적해를 얻기 위해서는 유전 알고리즘에서와 같은 돌연변이를 필요로 하게 된다. 여기서 돌연 변이는 크게 두 가지로 나누어진다. 하나는 전혀 새로운 씨앗을 만들어 내는 것(new seed generation)이며, 다른 하나는 기존의 씨앗 중에서 두 개를 골라서 서로 교배하는 것(cross over)이다.

전혀 새로운 씨앗을 만드는 데에는 몇 가지의 기본적인 법칙들이 적용이 된다. 새로운 씨앗을 만드는 데에는 전체 공정 흐름 중에서 연결이 되지 않고 있는 공정 흐름의 연결을 가장 먼저하여야 하고, 연결이 되어 있다면 가장 많은 열이 남아 있는 흐름을 선택하여야 하는 것도 당연하다.

다음으로 두 개의 씨앗을 골라 서로 교배하는 방법으로 돌연변이를 만드는 것이다. 유전 알고리즘에서는 이런 교배 방법으로 진화를 하지만, 본 연구에서는 이를 돌연변이를 수행하는 방법으로 사용하고 있다. 먼저 현 세대에서 비교의 대상이 가장 나쁜 것을 두 개를 고르게 된다. 여기서 비교의 대상은, 앞서 일반적인 진화 방법에서 말하였듯이, 목적 함수의 값이 될 수도 있지만 여기서는 더 많이 성장한 씨앗을 보존하기 위하여 목적 함수와 교환된 열량의 비를 사용하였다. 이렇게 하여 선택된 두 개의 씨앗 중에서 교환되는 열량이 작은 것을 기준으로 하여 4개의 세포를 그림 4와 같이 바꾸게 된다. 즉, 그림 4에서는 기준에 있던 두 개의 씨앗은 1-3, 2-4로 구성이 되어져 있던 것을 1-4, 2-3으로 교배를 시켜서 새로운 씨앗을 형성하였다.

그림 4에서 교배가 된 과정에서 보면, 이전의 연결된 씨앗 1과 씨앗 2를 열량 교환이 작은 것을 기준으로 하여 새로운 씨앗 1과 씨앗 2를 만든다. 여기서 이렇게 돌연변이가 된 것은 이전의 것에 비해 반드시 목적 함수의 값이 좋다고는 말할 수가 없으며, 더구나 연결이 불가능한 경우도 생기

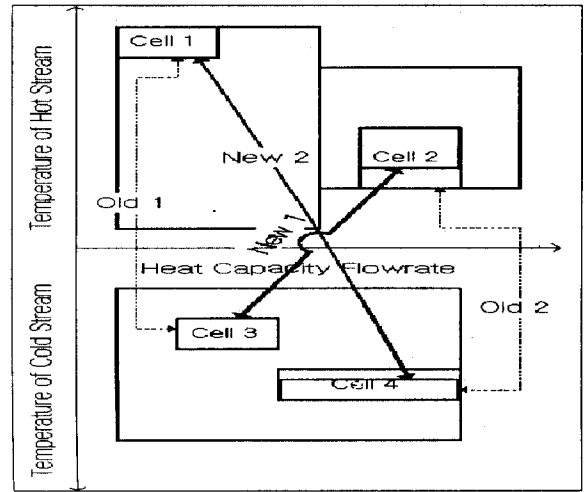


그림 4. 교배를 통한 돌연 변이.  
Fig. 4. Mutation with a crossover.

게 된다. 이런 경우에는 씨앗을 없애게 되며, 이를 보충하기 위해 새로운 씨앗을 만드는 과정을 수행하게 된다.

돌연변이는 위와 같은 두 가지 방법으로 수행을 하게 된다. 그러나 이러한 돌연변이를 아무 때나 수행하는 것은 아니다. 담금질 모사법의 기본적인 방법에서 알 수가 있듯이 돌연 변이는 반복 계산의 횟수가 늘어 나면서 돌연변이의 확률을 줄임으로서 계산 과정이 수렴을 하도록 한다. 여기서도 이 생각을 적용하여 돌연 변이를 발생시킨다. 이를 위해 사용한 방법은 담금질 모사법에서 Kirkpatrick[8]등이 제시한 담금질 방법으로 가장 간단한 것인 반복 계산 횟수에 따라 돌연 변이 확률을 줄였다. 담금질 모사법에서도 담금질 방법으로는 Aarts과 van Laarhoven[14]에 의해 제시된 방법 등 여러 가지가 있지만 여기서는 가장 간단한 방법을 사용하였다.

돌연변이가 일어날 수 있는 확률이 되었다고 해도 돌연변이가 생기는 경우는 다음과 같은 경우로 한정한다. 먼저 돌연변이는 서로 연결이 되지 않은 공정 흐름이 있는 경우에 수행이 된다. 그리고 다른 공정 흐름에 비하여 현저하게 교환되는 열량이 적은 공정 흐름에 대해서도 돌연변이를 수행하여 새로운 씨앗을 만들게 된다. 그리고 반복 계산 횟수

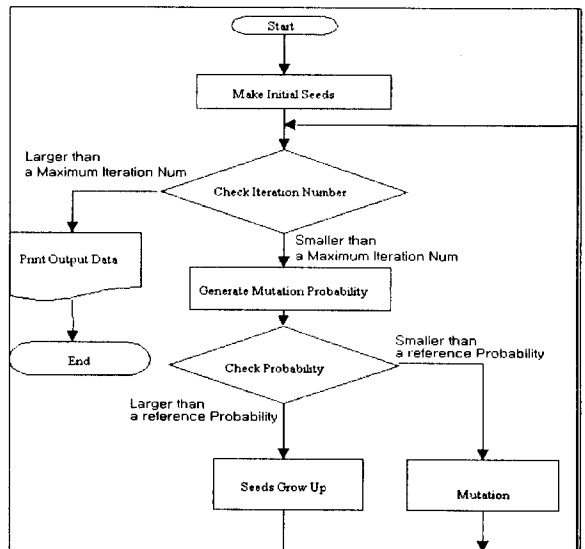


그림 5. 전 과정의 순서도.  
Fig. 5. Flowchart of procedure.

에 반비례하여 돌연변이를 수행하게 하였다. 또한 현재까지 찾은 목적 함수의 최적값과 현 세대의 목적 함수 값과의 차이에 의해서도 돌연 변이가 발생하는 확률에 영향을 주었다.

본 연구에 의해 수행되는 프로그램 순서를 요약하면 그림 5와 같다. 즉, 초기 구조를 설정한 후에 성장과 돌연 변이를 확률적 판단에 의해 반복하면서 최적의 구조를 찾아나가는 것이다. 여기서 각 씨앗들의 비교 우위를 판단하는데에는 전체 총 비용과 교환되는 열량과의 비를 사용하여 단순한 비용의 절대적인 비교에서 오는 오류를 피하고자 하였다. 그리고, 확률적 판단이라 함은 담금질 모사법에서와 같이 반복 계산 횟수, 즉 세대 수가 증가하면서 확률을 줄여 나감으로 해서 문제가 수렴을 할 수가 있도록 하였다.

III. 예제를 통한 방법의 검증

본 연구에서 제시한 방법을 통하여 열교환망 합성에서의 몇 가지 문헌 상의 예제를 통하여 방법을 검증하여 보고자 한다. 먼저 기본적으로 초기에 주로 연구의 대상이 되어졌던 것과 1990년대에 핀치 기술을 이용하여 연구가 된 예제를 다룬다.

1. 기본적인 예제

여기서 다루는 기본적인 예제는 열교환망을 합성하는 데에 있어서 기본적인 비교의 대상으로 잘 나타나고 있는 4SP1, 5SP1, 6SP1, 10SP1 [15][16][17]을 다루고 있다. 여기서 nSP1이라는 것은 n은 전체 공정 흐름의 수를 나타내며, 1은 가장 시험 예제 1번이라는 것을 의미하고 있으며, 이는 일반적으로 문헌상에서 공통적인 기호로 사용이 되어 특정한 문제를 나타내고 있다. 여기서는 이들을 총 비용의 최소화에 대한 합성을 한 결과는 참조 구조와 비교하여 보았다. 이들 참조 문헌에 의한 결과들은 많은 검증을 통하여 최적값으로 입증된 것들이다.

예제 1(4SP1) : 4SP1에 대해서 제시한 방법을 적용하면 참조 문헌과 같은 결과를 나타내고 있다. 본 연구에 의한 결과는 그림 6에서 알 수가 있다. 구조가 같기 때문에 이에 따른 비용은 모두 같다.

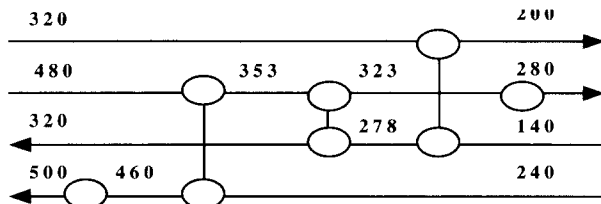


그림 6. 4SP1의 합성.  
Fig. 6. Synthesis of 4SP1.

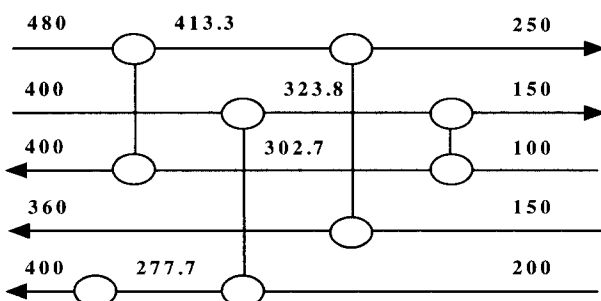


그림 7. 5SP1의 합성.  
Fig. 7. Synthesis of 5SP1.

예제 2(5SP1) : 본 방법에 의한 구조는 그림 7에서 나타내고 있다. 본 방법에 의한 구조는 참고 문헌의 구조를 다르지만 목적 함수에 있어서는 0.3%의 오차만이 나타나고 있다

예제 3(6SP1) : 참고 문헌에 나온 구조와 본 방법에 의해 합성한 구조를 그림 8과 그림 9에서 나타내고 있다. 6SP1에 있어서는 목적 함수가 6% 적게 나오는 것을 볼 수가 있다. 이는 참고 문헌의 결과가 H1 흐름에 대하여 냉각수를 사용하는 데에 최소 접근 온도차인 20도를 유지 하기 위하여 냉각수의 온도가 157도까지 밖에 못 올리고 있다. 그러나 본 연구에 의한 디자인에서는 180도까지 최대한 온도를 올리고 있기에 냉각수의 양이 줄어들어서 생긴 결과이다.

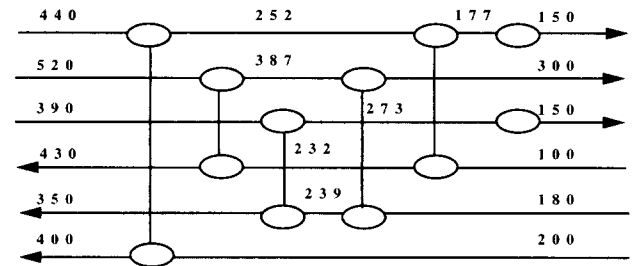


그림 8. 참고 문헌에 의한 6SP1의 합성.  
Fig. 8. Synthesis of 6SP1 in reference.

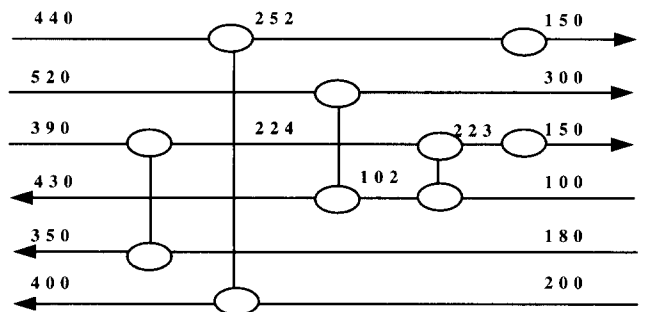


그림 9. 본 연구에 의한 6SP1의 합성.  
Fig. 9. Synthesis of 6SP1 with this method.

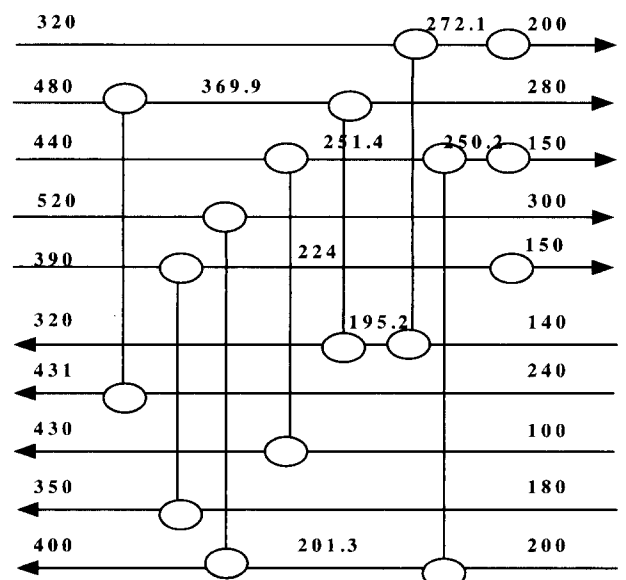


그림 10. 10SP1의 합성.  
Fig. 10. Synthesis of 10SP1.

예제 4(10SP1) : 그림 10에는 본 방법에 의한 구조를 나타내고 있다. 10SP1의 경우에는 참고 문헌의 경우에는 냉각 열 교환기를 2개를 사용하고 있는 데 반하여 본 연구에서는 냉각 열 교환기를 3개를 사용하고 있기에 다소 비용이 증가하는 것을 볼 수가 있다.

예제(1-4) 결과의 비교 : 기존의 제시된 방법에 의한 결과와 제시한 방법에 의해 얻게 된 결과를 비교하면 표 1과 같다. 여기서 비용의 단위는 \$/yr이다.

표 1. 기본적인 예제의 비교.

Table 1. Comparison with simple examples.

Cost : [\$/yr]

	참고 문헌			본 연구			오차 (%)
	투자비	유틸리티	총 비용	투자비	유틸리티	총 비용	
4SP1	3285	10304	13590	3285	10304	13590	0
5SP1	5316	33402	38718	5382	33449	38831	0.3
6SP1	7950	29379	37329	7254	27762	35016	-6
10SP1	34510	9640	44150	34510	11268	45778	3

목적 함수인 총 비용의 최소화를 가지고 계산을 하였기 때문에 목적 함수 값이 문헌 상에서 최적이라고 하였던 것보다 비교하여 볼 때 비교적 오차가 적었다. 따라서 이런 예제 문제에 대하여 해의 신뢰성을 가질 수가 있게 되었다.

결과 중에서 6SP1의 경우에는 참고 문헌에는 목적 함수의 값이 35010 \$/yr로 나와있다. 하지만 참고 문헌에 나와 있는 구조는 실제로는 구성되지 못하는 구조이며, 이를 다시 전산 모사를 하여보면 위와 같은 결과를 얻게 된다. 그리고 참고 문헌의 값 자체를 비교 대상으로 사용하면, 본 연구에서 구한 목적 함수는 참고 문헌에서의 값과 비슷하게 되는 것을 알 수가 있다.

2. 발전적인 예제

제시한 방법으로 구해진 해의 신뢰성을 높이고 접근 방법의 타당성을 검증하기 위하여 Linnhoff와 Ahmad[18][19]에 의해 제시되었고, Zhu 등[12]에 의해 다시 접근 되어진 예제에 적용을 하였다.

예제 5 : 각 문헌 들에서는 최소 접근 온도차를 10도로 하여 합성을 하였다. 여기서 Linnhoff와 Ahmad의 결과 [18][19]와 Zhu 등의 결과[12]와 본 연구의 결과를 비교하였다. 본 연구에서 제시된 방법에 의한 초기 합성의 구조는 그림 11와 같다. 또, 이들 5개의 구조에 대한 각각의 데이터를 보면 표 2와 같이 나타난다.

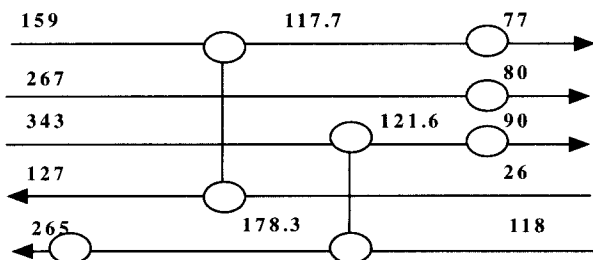


그림 11 예제 5의 합성.

Fig. 11. Synthesis of example 5.

본 연구에 의하여 제시된 초기 합성 구조의 결과가 기존의 결과보다는 2% 정도의 오차를 나타내고 있다.

예제 6 : 여기서는 최소 접근 온도차를 30도로 하여 계산을 하였다. 여기서도 앞서의 예제와 마찬가지로 Linnhoff

표 2 예제 5의 비교.

Table 2. Comparison with example 5.

Util : [KW/yr], Area:[m2], Cost:[\$/yr]

		Hot Util	Cold Util	Area	Units	Cost
Linnhoff	초기	7000	4000	19690	8	1.60e6
	최적	6832	3832	20394	8	1.59e6
Zhu	초기	7000	4000	20816	8	1.63e6
	최적	8087	5087	19830	6	1.63e6
본연구	초기	8154	5154	19710	6	1.64e6

와 Ahmad의 결과[18][19]와 Zhu 등의 결과[12]와 본 연구의 결과를 비교해 보고자 한다. 본 연구에서 제시된 방법에 의한 초기 합성의 구조는 그림 12와 같다. 이들 5개의 구조에 대한 각각의 데이터를 보면 표 3과 같다.

표 3에서 알 수가 있듯이 본 연구에 의한 값은 다른 방법에 의해 구해진 초기 합성의 경우보다는 좋은 구조를 얻었다. 반면에 다른 방법에 의한 초기 합성의 구조를 최적화한 구조보다는 목적 함수의 값이 다소 떨어지는 결과를 나타내고 있다. 그 차이가 최적 구조와 비교를 하여도 약 5% 이내의 차이를 가지고 있다.

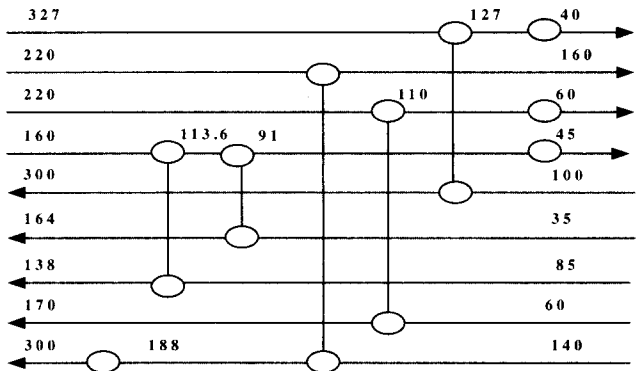


그림 12. 예제 6의 합성.

Fig. 12. Synthesis of example 6.

표 3. 예제 6의 비교.

Table 3. Comparison with example 6.

Util : [KW/yr], Area:[m2], Cost:[\$/yr]

		Hot Util	Cold Util	Area	Units	Cost
Linnhoff	초기	139.4	124.8	320	9	5.12e4
	최적	144.3	118.5	289	7	4.68e4
Zhu	초기	149.5	123.4	293	8	4.96e4
	최적	170	128.6	243	6	4.67e4
본연구	초기	169	148	283	6	4.90e4

예제 7 : 이번에 다루고자 하는 예제는 방향족 공장(aromatic plant)에 대한 예제이다. 이는 Linnhoff와 Ahmad [18][19]가 핀치 기술을 사용하여 처음으로 접근하였으며, Wood et al.의 문헌[20]에서 허상의 핀치 합성 방법(pseudo-pinch design method)를 통하여 다루었고, Zhu et al.[12]에 의해 다시 다루어졌던 문제이다. 여기서는 Zhu et al.가 사용한 데이터, 즉 Linnhoff와 Ahmad가 사용한 데이터를 기준으로 비교하여 보겠다. 여기서는 최적 최소 접근 온도차를 26도를 사용하였다. 본 연구에서 제시된 방법에 의한 초기 합성의 구조는 그림 13과 같다. 위의 네 구조에 대한 데이터는 표 4와 같다.

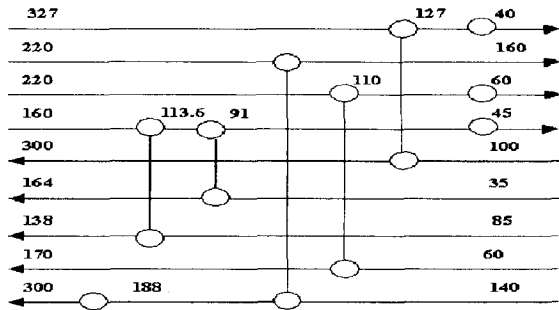


그림 13. 예제 7의 합성.  
Fig. 13. Synthesis of example 7.

표 4의 결과에서 볼 수가 있듯이 본 연구의 초기 합성 구조의 목적 함수 결과가 기존에 제시된 최적화된 구조의 목적 함수 결과에 비하여 2% 정도 더 나오는 것을 볼 수가 있다. 이는 다른 구조들은 모두 최적화를 거친 것으로 본 연구에 의한 디자인은 초기 합성이기 때문에 나타나는 것으로, 다른 방법들의 초기 디자인의 값이 대략 3.13\*10<sup>6</sup> \$/yr 가 나오는 것을 감안하면 비교적 좋은 초기 합성임을 알 수가 있다.

표 4. 예제 7의 비교.  
Table 4. Comparison with example 7.

Util : [MW/yr], Area:[m<sup>2</sup>], Cost:[\$/yr]

	Hot Util	Cold Util	Area	Units	Cost
Target (26K)	25.04	32.76	16984	10	2.91e6
Linnhoff	25.31	33.03	17398	13	2.96e6
Zhu 1	25.62	33.34	17464	10	2.98e6
Zhu 2	25.95	33.67	17395	10	2.99e6
본연구 초기	26.88	34.6	17233	10	3.02e6

3. 요약

예제를 7개를 풀어 보면서 본 연구에 의한 초기 열 교환 망 합성의 결과는 기존에 제시된 방법에 의한 초기 결과와 비교하여 보았을 때 비슷하거나 우수한 결과를 얻을 수가 있었다. 또한 상당 부분에 있어서는 기존에 제시된 방법에 의한 최적 합성의 결과와도 비슷하거나 우수한 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법의 우수성과 신뢰성을 확신할 수가 있었다.

IV. 결론

본 연구를 통하여 열교환망의 합성에서 최소의 가정도 도입을 하지 않고도 문제에 접근 할 수가 있는 방법을 제시하였다. 기존에 제시된 방법과의 비교 대상을 목적 함수의 값이라고 볼 때, 이는 가정을 통한 문제의 변형을 막고자 한 것을 어느 정도 달성하였다고 하겠다. 그리고 가능한 사람의 힘을 빌리지 않고 자동화된 열교환망의 합성을 하는 방법을 제시하였다. 이는 최근에 요구가 되어지고 있는 컴퓨터에 기반을 둔 자동화 합성 방법을 만든 것이다.

본 연구에서는 기존의 문제를 접근하는 데에 사용이 되는 가정들을 전혀 도입하지 않고 목적 함수의 값만을 이용하여 열교환망을 합성하였다. 그러나 현재까지 여러 부분에서 좋은 결과를 내고 있는 핀치 기술의 활용도를 이용하여 본 방법을 적용시킬 수가 있다. 먼저 핀치를 통하여 문제를

분석한 다음, 핀치를 통해 각 구간으로 나눈 뒤 각종 경험 법칙을 활용하여 열교환망을 합성하였던 것이 기존의 방법이다. 여기서 경험 법칙을 활용하는 단계에서 본 접근 방법을 활용하여 각 구간 별로 열교환망을 합성하는 것도 가능하다. 그리고 본 연구에서는 최적화는 고려하지 않고 열교환망의 초기 합성만을 다루었음에도 불구하고 기존의 제시된 방법과 비교를 하여 보았을 때 좋은 결과를 얻을 수가 있었다. 또한 현존하는 공정을 초기 씨앗으로 활용하면 열교환망의 개조 및 보수에도 적절하게 응용이 될 수가 있다.

참고문헌

- [1] C. S. Hwa, "Mathematical formulation and optimization of heat exchanger networks using separable programming," *AIChE-Intern. Chem. Eng. Symp. Ser.*, 4, 1965.
- [2] B. Linnhoff and E. Hindmarsh, "The pinch design method for the heat exchanger networks," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 38, no. 5, pp. 745-763, 1983.
- [3] B. Linnhoff, "Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 90, no. 8, pp. 32-57, 1994.
- [4] J. Cerda and A. W. Westerburg, "Synthesizing heat exchanger networks having restricted stream/stream matches using transportation problem formulations," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 38, pp. 1723, 1983.
- [5] A. R. Ciric and C. A. Floudas, "A mixed integer nonlinear programming model for retrofitting heat-exchanger networks," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 29, no. 2, pp. 239, 1990.
- [6] T. F. Yee and I. E. Grossmann, "A screening and optimization approach for the retrofit of heat-exchanger networks," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 146, 1991.
- [7] W. B. Dolan, P. T. Cummings and M. D. Le Van, "Process optimization via simulated annealing Application to network design," *AIChE Journal*, vol. 35, no. 10, pp. 725, 1989.
- [8] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, pp. 671, 1983.
- [9] I. P. Androulakis and V. Venkatasubramanian, "A genetic algorithmic framework for process design and optimization," *Computers Chem. Engng.*, vol. 15, no. 4, pp. 217, 1991.
- [10] E. Rev and Z. Fonyo, "Diverse pinch concept for heat exchange network synthesis: the case of different heat transfer conditions," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 46, no. 7, pp. 1634, 1991.
- [11] D. M. Fraser, "The use of minimum flux instead of minimum approach temperature as a design specification for heat exchanger networks," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 44, no. 5, pp. 1121, 1989.
- [12] X. X. Zhu, B. K. O'Neill, J. R. Roach and R. M. Wood, "A new method for heat exchanger network synthesis using area targeting procedures," *Computers Chem. Engng.*, vol. 19, no. 2, pp. 197, 1995.

[13] Z. Kravanja and P. Glavic, "Cost targeting for HEN through simultaneous optimization approach : a unified pinch technology and mathematical programming design of large HEN," *Computers Chem Engng.*, vol. 21, no. 8, pp. 833, 1997.

[14] Aarts E. H. L. and P. J. M. van Laarhoven, "Statistical cooling : a general approach to combinatorial optimization problems," *Philips J. Res.* vol. 40, pp. 193, 1985.

[15] T. K. Pho. and L. Lapidus, "Topics in computer-aided design : part II. Synthesis of optimal heat exchanger networks by tree searching algorithm," *AIChE Journal*, vol. 19, no. 6, pp. 1182, 1973.

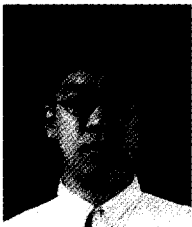
[16] J. W. Ponton and R. A. B. Donaldson, "A fast method for the synthesis of optimal heat exchanger networks," *Chem. Eng. Sci.* vol. 29, pp. 2375, 1974.

[17] I.-B. Lee, "Optimal synthesis of flexible heat exchanger networks," Thesis of Doctor, Purdue Univ., 1987.

[18] B. Linnhoff, S. Ahmad, "Cost optimal heat exchanger networks-1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost," *Computers Chem Engng.*, vol. 14, no. 7, pp. 729, 1990.

[19] S. Ahmad, B. Linnhoff, "Cost optimal heat exchanger networks-2. Targets and design for detailed capital-cost models," *Computers Chem Engng.*, vol. 14, no. 7, pp. 751, 1990.

[20] R. M. Wood, Suaysompol, B. K. O'Neill, J. R. Roach and K. K. Trivedi, "A new option for the heat exchanger networks design," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 87, no. 9, pp. 38, 1991.



**이 규 황**

1996년 포항공대 화공과 졸업. 동대학원 석사. 현재 포항공과대학교 화학공학과 박사과정, 관심 분야는 공정합성 및 최적화.



**김 민 석**

1991년 포항공대 화공과 졸업. 동대학원 석사(1993). 동대학원 박사(1997)-현재 LG-EDS 시스템, 관심분야는 공정 합성 및 최적화.



**이 인 범**

1977년 연세대학교 화공과 졸업. 한국 과학 기술원 석사(1979). 미국 Purdue 대 박사(1987). 현재 포항공과대학교 화학공학과 교수, 관심분야는 공정합성, 최적화 및 자동화.



**고 흥 철**

1983년 전남대학교 공정설계학과 졸업. 서울대학교 대학원 석사(1985), 동대학원 박사(1989). 현재 LG-Caltex 정유 중앙기술연구원 차장, 관심분야는 공정 제어, 공정최적화, 공정설계.