

최소 유틸리티 및 장치비를 위한 최적 열 교환망 합성

김경숙[°] · 조영상[°] · 김호기*

[°]한국과학기술연구원 화학공정연구소

*국가과학기술회의

Optimal Heat Exchanger Network Synthesis for Minimum Equipment Cost

Kim Kyeong Sook[°], Cho Young Sang[°] and Kim Hoa Gi*

[°]Chemical Process Lab., Korea Institute of Science & Technology

*Presidential Council on Science & Technology

요 약

열교환기의 설치비 및 연간 비용에 주된 영향을 미치는 유틸리티의 소비와 열 교환 장치 수의 최소화를 목적으로 하여 경험법칙을 기초로 한 열교환망 합성 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 열교환망 합성 알고리즘의 특징은 축소된 부문제 생성 기법과 부문제의 해를 구하는 방법에 있으며, 제안한 방법을 문헌에 실린 열교환망 합성 문제에 적용한 결과 이전의 결과보다 열교환장치 및 흐름의 분기등이 감소한 결과를 얻으므로써 본 방법의 우수성을 확인할 수 있었다.

Abstract

Two major difficulties with finding an optimal solution to the heat exchanger network synthesis problems are the large solutionspace and the uncertainty in the formulation of the annual cost function. In this work, to overcome the first difficulty a problem reduction technique was developed. The second difficulty was also removed by dividing the annual cost function into four cost items. The optimal network structure for minimum equipment cost is then obtained by repeatedly applying the problem reduction technique and the heuristics in turn. The efficiency and the superiority of the method is demonstrated by examining two selected example problems.

I. 서 론

화학 공정 합성의 주 관심사 중의 하나로 에너지 회수와 보존 면에서 매우 중요한 문제인 열교환망 합성은 지난 20년간 문헌에서 여러차례 발표한 바 있다. 열교환망 합성은 실생활에 관련된 문제이므로 기본적인 통찰을 통한 효율적인 해석에 의하여 많은 공정 산업에서 30-50%의 에너지 절약을 가져올 수

있다.¹⁾

합성문제는 Masso와 Rudd에 의하여 최초로 수식화되었으며 그후에 많은 연구자들(Hohmann⁵⁾; Nishida, Liu & Lapidus¹⁰⁾; Linnhoff & Flower⁶⁾; Linnhoff & Hindmarsh⁷⁾; Su & Motard¹³⁾; Floudas, Ciric & Grossmann⁹⁾)이 다양한 열교환망 합성 알고리즘을 제안하였다. 열교환망 합성의 주 목표는 최소 유틸리티 소비, 최소 장치 수 및 최소 열교환

면적 등으로 이 중 최소 유틸리티 개념은 Hohmann⁵⁾이 처음 제안하고 Linnhoff와 Flower⁶⁾가 핀치의 개념으로 발전시켰다. 최소 유틸리티만을 최소 장치수로 소비하기 위하여 Flower와 Linnhoff⁴⁾는 열역학적 조합 알고리즘을 제안하였고 Cerda와 Westerberg⁷⁾는 LP transshipment를 사용하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 Popoulias와 Grossmann¹²⁾은 MILP(Mixed Integer Linear Programming) 기법과 LP transshipment 모델을 함께 사용하였으며 근래에 Floudas, Ciric과 Grossmann³⁾ 외에 여러 연구자들이 주어진 열교환망의 최적화를 위하여 비선형 프로그래밍 기법(Nonlinear Programming Technique)을 제안하였다.

열교환망의 최적 합성은 에너지 절약 기술 현황, 열역학적 해석 및 공정공학적 지식을 총망라하여 종합적인 견해에서 가장 경제성있는 합성에 의하여 이루어진다. 일반적으로 목적함수는 연간 비용이나 설치비 등이 되고 이에 따른 변수들은 조업 조건, 원료와 제품의 특성, 부대 장치의 비용으로 구성된다. 즉 이러한 변수들을 활용하여 목적함수를 최소화시킨 것이 최적 열교환망이라 할 수 있는데 본 연구에서는 연간 비용 및 설치비에 주된 영향을 미치는 유틸리티의 소비와 열교환 장치 수의 최소화를 우선으로 하여 경험법칙을 기초로한 열교환망 합성 방법을 제안하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에서 제안하는 열교환망 합성 알고리즘의 특징은 1) 축소된 부문제 생성 기법과 2) 부문제의 해를 구하는 방법에 있으며, 최소 비용을 위한 열교환망 합성시의 우선순위는 다음과 같이 정하였다.

- 1) 최소 유틸리티 소비
- 2) 최소 열교환기 수
- 3) 최소 흐름의 분기
- 4) 주어진 열교환망에 대한 최소 열교환 면적

전체 열교환망 합성 과정은 그림 1과 같으며, 처음에 핀치 온도를 계산하여 독립적으로 열교환을 할 구간을 결정하고 각 구간에 경험 법칙을 적용하여 최적 열교환망을 구한다.

열교환망 합성에 있어 가장 중요한 개념은 핀치⁸⁾라고 할 수 있다. 핀치의 발견으로 우리는 핀치 상

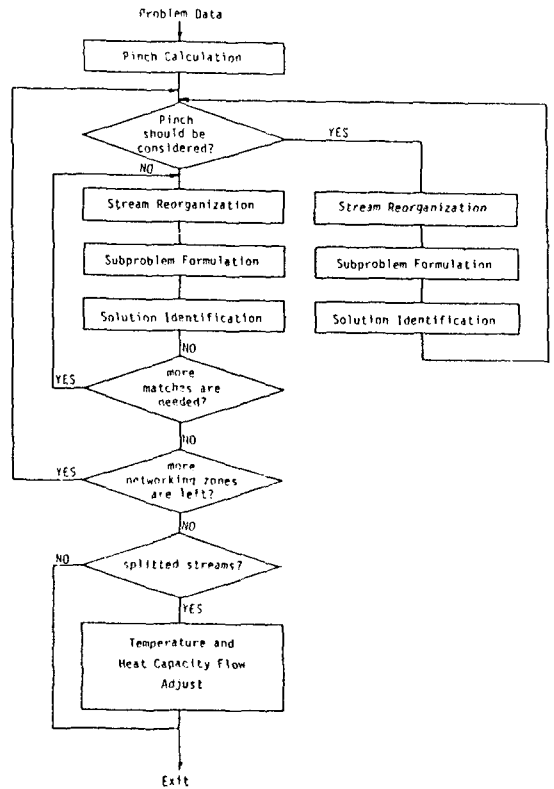


그림 1. 열교환망 합성과정.

단에 위치한 흐름과 핀치 하단에 위치한 흐름 사이의 열교환은 스템의 소모량과 냉각수의 소모량을 동시에 필요이상으로 증가시킨다는 사실을 알았다. 따라서 최소 유틸리티만을 사용하기 위해서는 핀치 상단에서는 핀치 상단에 위치한 흐름들만으로 열교환을 하고 핀치 하단에서는 핀치 하단에 위치한 흐름들만으로 열교환을 하도록 열교환망을 구성하여야 한다. 또한 필수 열교환에서 소개할 핀치에서의 제약조건을 만족시키기 위해서 열교환망 합성 작업은 핀치 상하단에서 동일하게 핀치로 시작되어야 목표인 최소 유틸리티의 사용을 달성할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 핀치의 특성과 최소 유틸리티 사용을 위한 제약조건을 바탕으로부터 출발하여 핀치에서의 최적 열교환 논리와 핀치의 제약이 해소된 경우의 열교환 논리를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 핀치에서의 온류와 냉류들 사이의 열교환을 필수 열교환(essential match), 그리고 핀치에서의 열교환망 합성이 종료된 후 남은 온류와 냉류들 사이의 열교환을 잔류 열교환(residual ma-

tch)이라 부르기로 한다. 핀치의 개념에서 지적되었듯이 핀치 상단에서는 온류에 냉각기를 설치할 수 없다. 즉 핀치 상단에 위치한 모든 온류들은 핀치 상단에 위치한 냉류들과의 열교환만으로 핀치 온도에 도달하여야 한다. 동일하게 핀치 하단의 냉류들은 가열기를 사용하지 않고 온류들과의 열교환만으로 가열되어 핀치 온도에 도달하여야 한다. 따라서 본 연구에서의 열교환망 합성 논리 개발의 목표는 핀치 상단에서의 필수 열교환의 경우 냉각기 사용없이 냉류들과의 열교환을 통하여 모든 온류들을 핀치 온도까지 냉각시키는 것이며 증속 열교환의 경우 역시 냉각기의 사용없이 냉류들과의 열교환만을 통하여 모든 온류의 가열 용량을 소진시키는 것이다. 동일한 이유에서 핀치 하단에서는 필수 열교환의 경우 가열기의 사용없이 모든 냉류들을 핀치 온도까지 가열하는 것, 그리고 증속 열교환의 경우 가열기의 사용없이 모든 냉류들의 냉각 열용량을 소진시키는 것이다.

본 연구에서 필수 열교환의 경우, 핀치 온도에 도달하여야 할 모든 온류들과 핀치 온도에서 시작되는 모든 냉류들 사이의 열 용량 흐름을 비교하여 증속 문제들을 만들어내고, 이러한 증속 문제들을 모든 관련 온류들 또는 냉류들이 핀치 온도로 각각 냉각 또는 가열될 때까지 반복하여 해결함으로써 열교환망을 합성하는 논리와 증속 열교환의 경우, 주어진 또는 계산된 온류와 냉류들의 원천 온도 또는 목표 온도들을 비교하여 증속 문제들을 만들어내고 이들 증속 문제를 냉각기 또는 가열기가 필요할 때까지 반복 계산하여 열교환망을 구성하는 논리를 개발하였다.

2.1 필수 열교환

온도 구간법에 의해 계산된 핀치 온도로부터 최소 유틸리티 사용을 위한 열교환망 합성구간이 설정되어지게 된다. 즉 핀치 온도 상단에 존재하는 온류와 핀치 온도 하단에 위치한 냉류사이에 열교환을 하는 경우 최소 유틸리티 이상의 불필요한 유틸리티를 사용하게 되며 따라서 핀치 온도 상단에 위치한 온류들은 핀치 상단에 위치한 냉류들과의 열교환만을 고려하여야 한다. 본 장에서 필수 열교환과 증속 열교환의 논리를 핀치 상단에 대하여만 적용해 보도록 하겠다.

핀치 온도 상단에서의 필수 열교환은 핀치 온도를 목적온도로 하는 온류들이 존재하는 경우에만 고려할 필요가 있다. 따라서 다음의 경험 법칙들은 핀치 온도를 목적온도로 하는 온류가 한개 이상 존재한다는 가정하에 개발된 것이다.

〈증속 문제의 형성〉

핀치 온도 상단을 고려할 때 핀치 온도에서 만족하여야 할 가장 중요한 제약조건은 서로 열교환을 하는 냉류의 열 용량흐름이 온류의 열용량 흐름보다 반드시 크거나 같아야 한다는 것이다. 따라서 냉류나 온류들의 열용량 흐름을 크기의 순으로 나열한 후 위의 조건을 만족시키는 온류들과 냉류들의 열교환을 생각하여야 한다. 예를 들어 핀치온도가 원천온도인 냉류가 NC개, 핀치온도를 목표온도로 하는 온류가 NH개 있다고 하면 다음과 같이 열용량 흐름의 크기에 따라 배열할 수 있다.

$$C_{cp1} > C_{cp2} > C_{cp3} \dots > C_{cpNC}$$

$$H_{cp1} > H_{cp2} > H_{cp3} \dots > H_{cpNH}$$

여기에서 C_{cpi} 는 냉류 i의 열용량 흐름을 나타내는 것이며 H_{cpj} 는 온류 j의 열용량 흐름을 나타내는 것이다. 여기에서 같은 순번에 위치한 냉류와 온류의 열용량 흐름을 비교하면 다음의 두 가지 경우가 나타난다. 이 때 NH가 NC보다 큰 경우도 경우 2에 해당된다.

경우 1(HE 1) : $C_{cpk} > H_{cpk}, k=1,2,\dots,NH$

경우 2(HE 2) : $C_{cpk} > H_{cpk}, C_{cpj} < H_{cpj}, k=1,2,\dots,j-1$

핀치 상단에서의 목표는 냉각기 없이 모든 온류들의 열교환용량을 냉류와의 열교환만으로 소진시키는 것이다. 따라서 HE 1의 경우에 대하여 다음과 같은 두 가지 경험법칙이 존재하게 된다.

경우 1-1(HE 1-1) : 가능한한 온류의 열교환 용량을 완전하게 소진시킬 수 있는 냉류를 찾는다.

경우 1-2(HE 1-2) : 냉류의 열교환 용량을 완전히 소진시키도록 열교환을 한다.

다음의 그림 2와 그림 3은 경우 1의 각 경우들에 대하여 구성된 열교환망을 나타낸 것이다.

경우 2에서 j-1개의 냉류와 j개의 온류를 열교환하여 j개의 온류들이 모두 핀치 온도까지 냉각되어야 하기 때문에 냉류를 분기하여 j개의 냉류를 형성하여

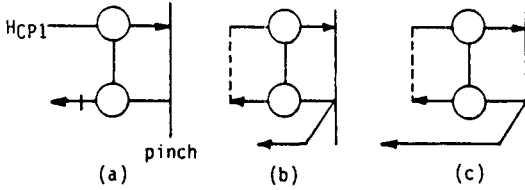


그림 2. 경우 HE 1-1에 대하여 가능한 열교환.

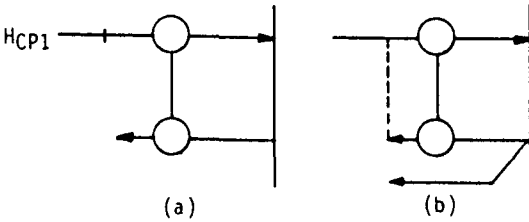


그림 3. 경우 HE 1-2에 대하여 가능한 열교환.

고려하는 방법과 온류를 분기하여 j번째에서의 냉류의 열용량흐름이 온류의 열용량흐름보다 크거나 같게 하는 방법이 있다. 따라서 다음의 두 가지 경우를 생각할 수 있다.

경우 2-1(HE 2-1) : 만약 $C_{cpj} > H_{cpm} + H_{cpj}$ 이면 i번째 냉류를 분기하여 m번째 온류와 열교환한다(단, $m < i$)

경우 2-2(HE 2-2) : 만약 $C_{cpi} < H_{cpm} + H_{cpj}$, $i=1, \dots, j-1$ 이면 온류중 하나를 분기한다.

여기에서 다시 경우 2-1은 열교환기 수효를 최소화 하면서 온류의 열용량흐름을 소진시켜야 한다는 목표를 만족시키기 위하여 다음의 세가지 경험 법칙을 생각할 수 있다.

경우 2-1-1(HE 2-1-1) : 분기된 냉류와 온류 모두의 열용량흐름이 소진되는 열교환을 찾는다.

경우 2-1-2(HE 2-1-2) : 온류의 열용량 흐름이 소진될 수 있도록 냉류를 분기한다.

경우 2-1-3(HE 2-1-3) : 분기된 냉류의 열용량 흐름이 소진되도록 냉류를 분기한다.

다음의 그림 4는 경우 2-1의 각 경우에서의 열교환을 보여준다. 경우 2-2는 역시 열교환기 수효를 최소화하는 동시에 열용량흐름을 소진시켜야 하는 목표에 보다 충실하기 위하여 다음과 같은 두가지의 경험법칙을 발생시킨다.

경우 2-2-1(HE 2-2-1) : 분기된 온류와 냉류 하나

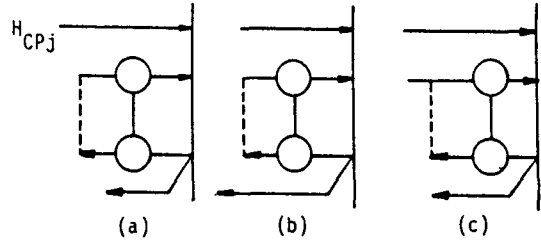


그림 4. 경우 HE 2-1에 대하여 가능한 열교환.

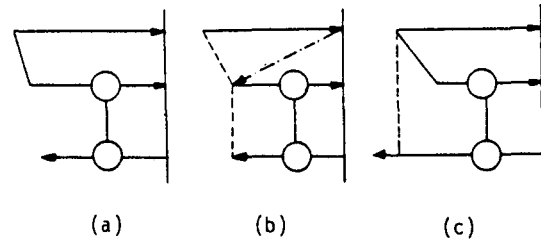


그림 5. 경우 HE 2-2에 대하여 가능한 열교환.

의 열용량 흐름을 소진시키는 온류를 찾아 분기한다.

경우 2-2-2(HE 2-2-2) : 분기된 온류의 열용량 흐름을 소진시키면서 열교환량을 최대로 하는 온류를 찾아 분기한다.

다음의 그림 5는 경우 2-2의 각 경우를 나타낸 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 핀치 온도 상단에서는 앞에서 소개한 경험법칙에 의해 모든 온류들이 핀치 온도로 냉각될 때까지 종속 문제를 형성하여 해를 구하는 과정에서 필수 열교환이 결정되는 것이다. 그림 6은 필수 열교환의 수행과정을 도시한 것이며 경험법칙의 적용 우선 순위는 나열한 순서와 같다.

〈필수 열교환의 타당성 검사〉

핀치 온도에서의 열교환 합성에 있어 두번째로 만족시켜야 할 조건은 핀치온도를 원천온도로 하는 냉류들의 열용량 흐름의 합은 항상 핀치온도를 목표온도로 하는 온류들의 열용량 흐름의 합보다 크거나 같아야 한다는 것이다. 따라서 i번째 냉류와 j번째 온류를 열교환시키기 위해서는 열교환 후 나머지 냉류와 온류들이 상기의 조건을 만족시키는지 를 검사할 필요가 있다. 만약 상기의 조건을 만족시키지 못하는 경우에는 i번째 냉류와 j번째 온류

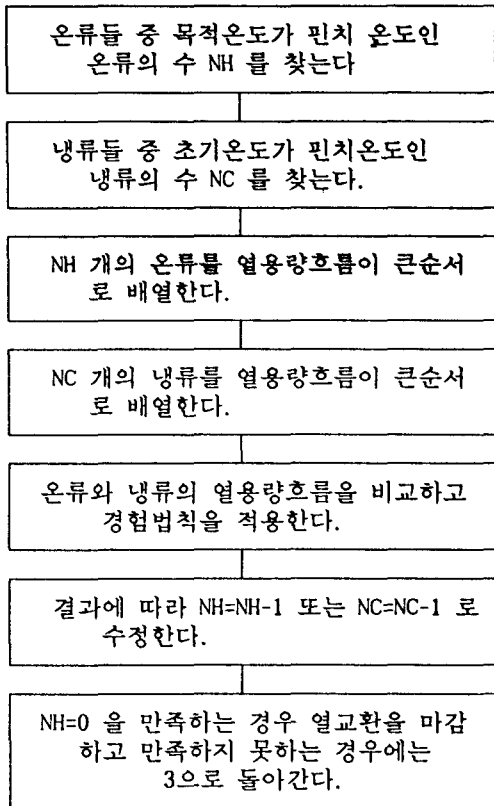


그림 6. 필수 열교환의 수행 과정.

와의 열교환은 포기하여야 한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^{NC} C_{cpk} > \sum_{m=1}^{NH} H_{cpm}$$

$$k=1,2,\dots,NC, k \neq i$$

$$m=1,2,\dots,NH, m \neq j$$

따라서 본 절에서의 경험법칙을 사용하여 열교환망을 합성하되, 열교환을 수행하기 전에는 반드시 타당성 검사가 이루어져야 한다.

2.2 종속 열교환

필수 열교환이 완료되면 핀치 온도 상단의 온류들은 모두 그 목적온도가 핀치 온도보다 높은 상태로 존재하게 된다. 이때 목표는 냉각기를 사용하지 않고 모든 온류들의 열용량 흐름을 냉류들과의 열교환에 의하여 소진시키는 것이며 열교환기의 수효를 최소로 만드는 것도 목표가 된다.

<종속 문제의 형성>

필수 열교환에서처럼 핀치 온도 상단에 대하여 고려하기로 하자. 필수 열교환과는 달리 종속 열교환에서 고려되는 온류들은 모두 목표온도가 핀치 온도보다 높으며, 또한 온류와의 열교환은 반드시 그 온류의 목적온도보다 낮은 원천온도를 갖는 냉류들과만 가능하다. 또한 모든 온류들을 동시에 고려하는 것보다는 온류 중 그 목적온도가 가장 낮은 온류 하나와 모든 냉류를 고려한다. 만약 최소의 열교환기를 이용하여 이 온류의 열용량흐름을 모두 소진시킬 수 있다면 종속 문제의 최적 해를 구하는 것이 되며 모든 종속 문제의 최적해를 종합하면 전체 계의 최적해를 구할 수 있다. 따라서 종속 문제들은 목적온도가 가장 높은 온류와 모든 냉류들로 형성되며 종속 문제의 해를 구한 후에는 자연스럽게 새로운 계에서 가장 목적온도가 높은 온류와 모든 냉류들에 의해 새로운 종속문제가 형성되게 된다.

종속 열교환에 있어 가장 중요한 제약조건은 온류의 목적온도로써, 즉 온류의 목적온도보다 낮은 원천온도를 갖는 냉류들을 확보하는 것이다. 따라서 종속 열교환에서는 온류와 냉류들의 목적온도와 원천온도가 낮은 순으로 배열하여 비교하는 것이 일차적으로 수행되어야 한다. 냉류들의 수효를 NC, 온류들의 수효를 NH라고 하면 다음과 같은 배열이 가능하다.

$$C_{st1} < C_{st2} < C_{st3} \dots < C_{stNC}$$

$$H_{tt1} < H_{tt2} < H_{tt3} \dots < H_{ttNH}$$

여기에서 C_{sti} 는 i 번째 냉류의 원천온도를 나타내는 것이며 H_{tj} 는 j 번째 온류의 목적온도를 나타내는 것이다.

위의 배열이 완료된 후 같은 순번에 위치한 냉류와 온류의 원천온도와 목적온도를 비교하면 다음의 두 가지 경우가 존재한다.

경우 1(HR 1) : $C_{stk} > H_{tk}, k=1,2,\dots,NH$

경우 2(HR 2) : $C_{stk} > H_{tk}, C_{stj} > H_{tj}, j=1,2,\dots,j-1$

핀치 상단에서의 목표는 가능한 최소의 열교환기를 사용하여 종속 문제의 온류, 즉 목적온도가 가장 낮은 온류의 열용량 흐름을 소진시키는 것이다. 따라서 경우 1에서 일차적으로 냉류 하나와의 열교환으로 목적을 달성하는 방법을 찾아야 할 것이며 다음으로는 냉류 둘을 사용하는 방법, 그리고 냉류

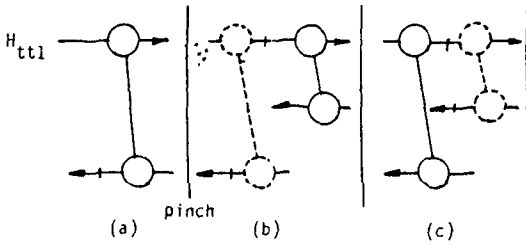


그림 7. 경우 HR 1-1에 대하여 가능한 열교환.

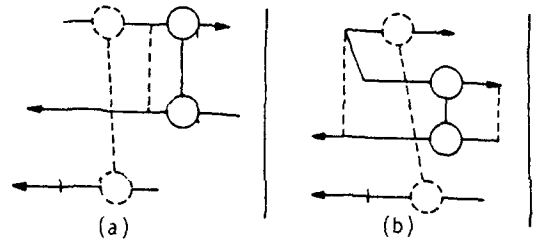


그림 9. 경우 HR 1-3에 대하여 가능한 열교환.

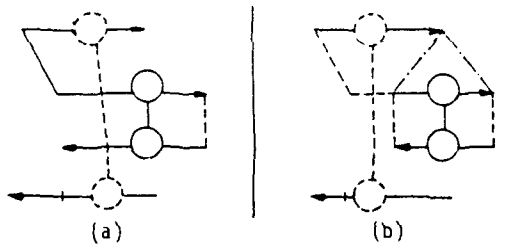


그림 8. 경우 HR 1-2에 대하여 가능한 열교환.

셋 이상을 이용해야 하는 경우 등을 분석하여야 될 것이다.

- 경우 1-1(HR 1-1) : 냉류 하나만으로 가능한 경우
- 경우 1-2(HR 1-2) : 냉류 둘을 사용하여 가능한 경우
- 경우 1-3(HR 1-3) : 냉류 둘 이상을 사용하여야 하는 경우

HR 1-1은 이를 만족시키는 냉류들을 열교환한 후 그 원천온도가 가장 높은 냉류를 선택하여야 한다. 이는 냉류의 효율성을 가장 높게 하려는 의도에서 선택한 것으로 다음의 그림 7이 이를 나타낸 것이다.

- 경우 1-2-1(HR 1-2-1) : 두 개의 냉류 중 원천온도가 높은 냉류의 열용량 흐름이 열교환에 의해 소진되도록 한다.
- 경우 1-2-2(HR 1-2-2) : 두개의 냉류 중 원천온도가 낮은 냉류의 열용량 흐름이 열교환에 의해 소진되도록 한다.
- 경우 1-2-3(HR 1-2-3) : 두개의 냉류 중 원천온도가 높은 냉류와 열교환을 시키되 열교환량이 가장 많은 냉류를 찾는다.

그림 8은 경우 1-2를 도시한 것으로 경험법칙이 열교환기와 가열기의 수효를 최소화하도록 도출된 것

임을 쉽게 알 수 있다.

경우 1-3은 두개의 냉류로도 종속문제의 온류의 열용량 흐름을 소진시킬 수 없는 경우이며 열교환기의 최소화를 위해서는 온류의 분기를 일차적으로 고려하여야 하며 온류의 분기가 불가능한 경우, 온류의 목적온도보다 낮은 원천온도를 갖는 냉류들 중에서 가장 열교환량이 큰 냉류와의 열교환이 필요할 것이다. 따라서 경우 1-3의 경험법칙은 다음과 같이 요약된다.

- 경우 1-3-1(HR 1-3-1) : 온류를 분기하되 분기된 온류와 냉류의 열용량 흐름을 모두 소진시킬 수 있는 냉류를 찾는다.
- 경우 1-3-2(HR 1-3-2) : 온류를 분기하되 분기된 온류의 열용량 흐름을 소진시키는 냉류들 중 열교환량이 최대가 될 수 있도록 냉류를 선택한다.
- 경우 1-3-3(HR 1-3-3) : 온류의 목적온도보다 낮은 원천온도를 갖는 냉류들 중 열교환량이 최대가 될 수 있도록 냉류를 선택한다.

그림 9는 경우 1-3을 도시한 것이다.

경우 2는 j-1개의 냉류 중 종속문제에서의 온류와 열교환을 한 후 새로운 원천온도가 H_{mj} 보다 낮게 되도록 냉류를 선택하여 열교환망을 구성하여야 한다. 또한 H_{mj} 보다 큰 모든 온류들을 대상으로 형성되는 종속문제들 중에서 최적해를 구하여야 하는 까닭에 경우 1과는 약간 다르다고 할 수 있다.

- 경우 2-1(HR 2-1) : 원천온도가 가장 낮은 냉류와 열교환이 가능한 모든 온류들과 열교환을 시도하여 온류의 열용량 흐름을 소진시키고 형성되는 새로운 냉류의 원천온도가 H_{mj} 보다 낮은 경우 선택이 가능하다. 그러나 j-1번째 냉류까지를 모두 위의 방법으로 시험하고

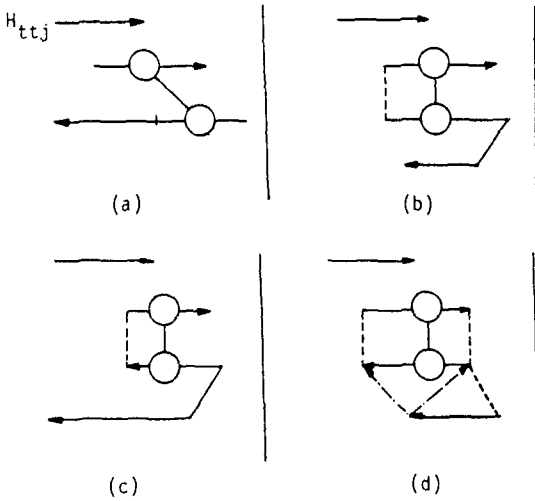


그림 10. 경우 HR 2-1에 대하여 가능한 열교환.

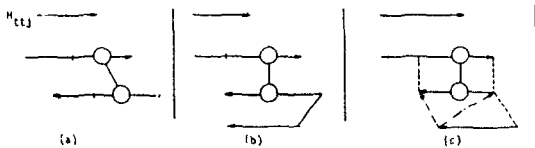


그림 11. 경우 HR 2-2에 대하여 가능한 열교환.

새로운 원천온도가 가장 낮은 냉류를 선택한다.

경우 2-2(HR 2-2): 냉류를 분기하되 분기된 냉류와 열교환되는 온류 모두의 열교환용량이 소진되는 흐름 중 열교환량이 최대가 되는 냉류와 온류를 선택한다.

경우 2-3(HR 2-3): 냉류를 분기하되 분기된 냉류와 열교환되는 온류의 열용량흐름이 소진되는 냉류-온류 모임 중 열교환량이 최대가 되는 것을 선택한다.

그림 10과 그림 11은 이상의 경우를 도시한 것이다.

종속 열교환에 있어서도 온류의 목적온도와 냉류의 원천온도를 비교하여 종속문제를 형성하고 열교환기의 수효가 최소가 되도록 경험법칙을 규정하였다. 그림 12는 종속 열교환의 수행과정을 도시한 것이며, 경험법칙의 적용에 있어서의 우선 순위는 위에 열거한 경우의 순이다.

〈종속 열교환의 타당성 검사〉

종속 열교환의 수행에 있어 앞의 경험법칙을 활

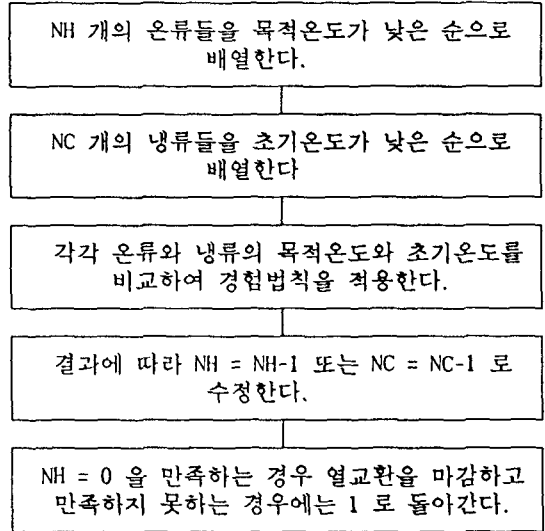


그림 12. 종속 열교환의 수행 과정.

용하되 열교환의 타당성이 조사되어야 비로소 열교환이 가능해진다. 대부분의 경우 온류와 냉류가 열교환할 때 냉류의 원천온도가 온류의 목적온도보다 낮게 되기 때문에 열교환이 가능하려면 열교환 후 형성되는 냉류의 새로운 원천온도보다 낮은 모든 온류와 냉류의 열용량흐름의 합을 비교하여 냉류들의 열용량흐름의 합이 온류들의 것보다 커야되며 또한 열교환에 의하여 소실되는 냉류의 순손실 열용량 흐름은 항상 온도구간범에서 계산된 최소 누적 잉여 열용량보다 낮아야 한다. 만약 이 두 가지 조건을 동시에 충족시킬 수 없는 경우에는 현재의 경험법칙을 포기하고 하위 경험법칙을 옮겨가야 한다.

3. 예제 및 결과

본 연구에서 제시한 열교환망 합성 방법의 적용례로서 Nishida 등¹⁰⁾의 예를 선택하여 그 결과를 비교하였다. 예제는 표 1에 주어졌으며 최소 접근온도는 Nishida 등과 같은 11.11 K로 하였다. 표 1의 예제는 온류의 온도에서 최소 접근 온도 11.11 K를 빼준값을 실은 것이다.

예제 1의 핀치 온도는 269.27 K로 모든 흐름의 온도가 핀치 상단에 속하게 되므로 온류의 모든 가열용량은 냉각기 없이 냉류에 의해서만 소진되어야

표 1. 예제 1(from Nishida *et al.*)

Stream	FC _p , KW/K	T _s , K	T _t , K
C ₁	36.927	269.27	488.72
H ₁	10.551	522.05	305.38
H ₂	26.376	483.16	372.05
H ₃	15.826	466.49	305.38

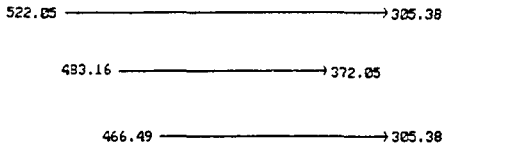


그림 13. 예제 1의 온류와 냉류.

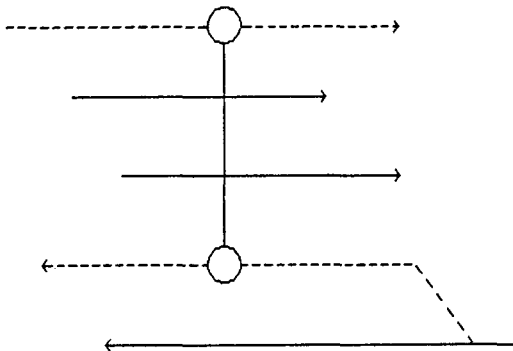


그림 14. 예제 1에 경우 HR 2-1을 적용한 결과.

한다. 그림 13에서 핀치 온도에 닿아 있는 냉류가 없으므로, 필수 열교환은 고려할 필요가 없으며 종속 열교환만 고려하면 된다. 종속열교환을 위하여 온류를 재배열하면 그림 13과 같다. 그림 13에서 H1과 H3는 목적 온도가 같으므로 첫째로 열교환할 온류가 두개 존재한다. H1을 선택하면 그림 10의 (b)와 같이 열교환되며 H2를 선택하면 그림 10의 (c)와 같이 열교환된다. 따라서 H1-C1의 열교환이 H2-C1의 열교환보다 유리하며 동일한 방법으로 그림 14에서 보듯이 분기되어 남은 C1은 H3와 열교환하여야 한다. 그러면 남아 있는 온류 H2는 H3와 열교환 후 남은 C1과 열교환함으로써 제거될 수 있다. 예제 1의 최종 열교환망은 그림 15와 같으며 이는 Nishida 등의 결과보다 각각 열교환기와 흐름의 분기가 두개씩 감소한 결과이다.

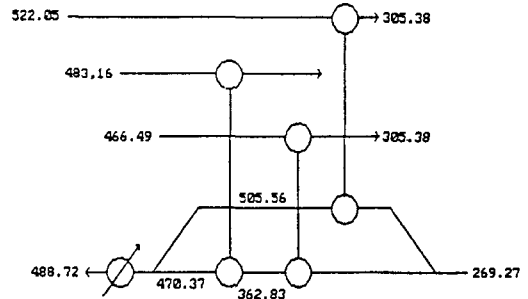


그림 15. 예제 1의 최종 열교환망.

표 2. 예제 2(from Floudas *et al.*)

Stream	FC _p , KW/K	T _s , K	T _t , K
H ₁	111.844	487.65	332.41
H ₂	367.577	332.41	305.00
H ₃	29.7341	390.48	295.00
C ₁	9.236	320.00	670.00
C ₂	112.994	368.72	450.00
C ₃	107.698	320.00	402.76

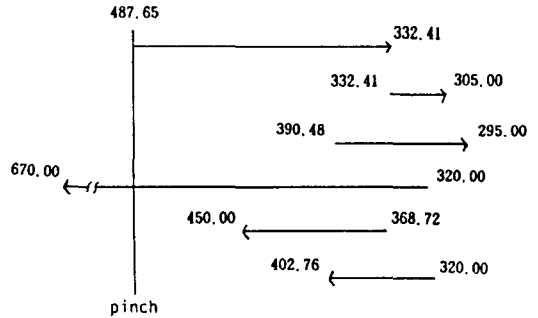


그림 16. 예제 2의 온류와 냉류.

본 연구에서 제안한 방법의 효율성을 입증하기 위하여 floudas 등³⁾의 예제에 적용하여 보았다. 표 2에 실린 예제 2의 핀치 온도는 492.65 K로 모든 흐름은 그림 16과 같이 배열될 수 있다. 이 때 핀치 상단에는 냉류만이 존재하므로 가열기를 사용하여 냉류를 핀치 온도까지 가열해 주어야 한다. 핀치 하단에서는 우선 온류 H1과 냉류 C1의 필수열교환을 고려해 주어야 하는데 온류의 분기없이 열교환을 할 경우 열교환 후 온류의 온도가 너무 낮아져 냉류의 냉각 용량을 소진시키기에 불충분해지므로 온류의 분기를 고려하여야 한다. 온류를 분기하면

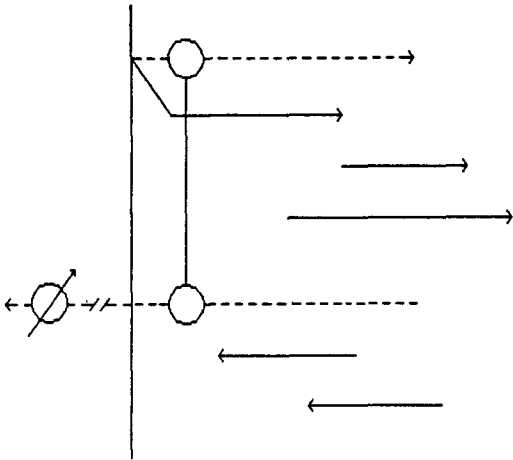


그림 17. 예제 2의 필수열교환 결과.

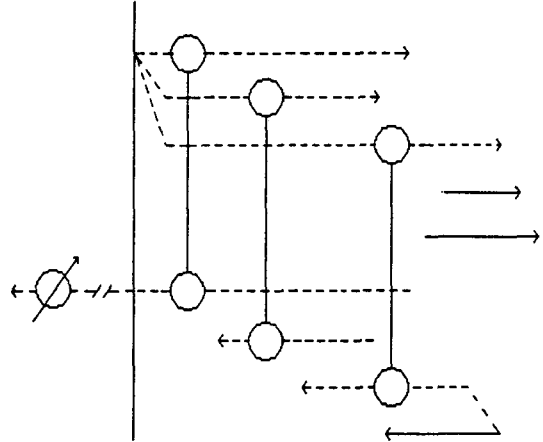


그림 19. 예제 2의 두번째 증속 열교환 결과.

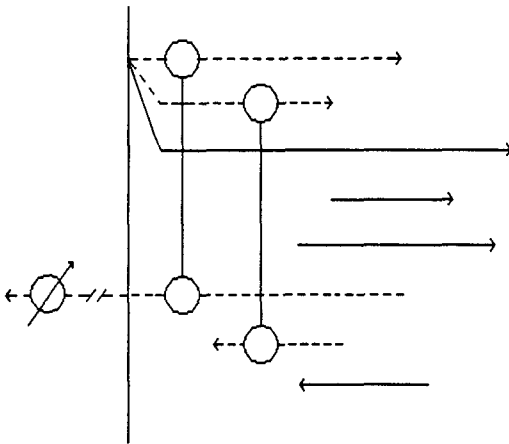


그림 18. 예제 2에 경우 HR 2-1을 적용한 결과.

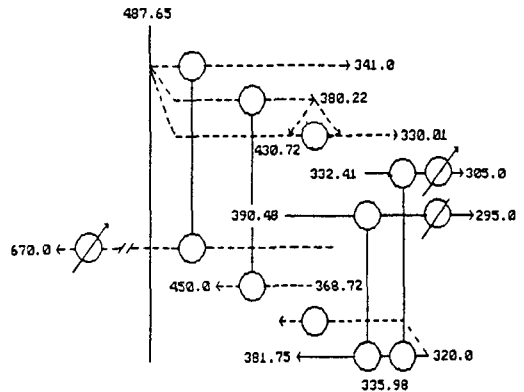


그림 20. 예제 2의 최종 열교환망.

과보다 열교환기가 2개 감소한 결과이다.

그림 17과 같이 열교환을 할 수 있다(그림 2의 (b)).

그림 17에서 핀치에 닿아있는 냉류가 존재하지 않으므로 증속 열교환의 경험 법칙을 적용한다. 냉류 C2와 분기후 남아있는 온류 H1이 온도가 가장 높으므로 첫번째로 열교환을 해준다. 필수열교환에서와 동일한 이유로 온류는 다시 분기되어야 한다(그림 10의 (b)). 열교환 결과는 그림 18과 같으며 남은 냉류의 열교환을 위하여 우선 순위대로 가능한 열교환을 고려한 결과 냉류의 분기가 불가피하며 이의 열교환 결과는 그림 19와 같다.

최종적인 열교환 결과는 그림 20과 같이 5개의 열교환기와 2개의 냉각기 그리고 1개의 가열기를 이용하여 얻어질 수 있으며 이는 Floudas 등의 결

4. 결 론

최소 유틸리티 소비와 장치비를 목적으로 한 열 교환망 합성 알고리즘이 개발되었다. 본 연구에서 제안하는 방법은 경험 법칙에 의거하여 문제를 축소하고 가능한 경우를 모두 고려하여 이를 우선 순위대로 적용함으로써 열교환망을 합성하는 것이다. 문제를 축소하기 위하여 최소 유틸리티 소비를 유지하면서 온류와 냉류가 열교환을 하도록 하는 타당성 조건들을 제안하였으며 이와 더불어 이전 연구자들의 연구를 토대로 경험 법칙을 개발하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 타당성 조건과 경험 법칙으로부터 문제를 축소하고 축소된 부분문제에 대

하여 가능한 열교환 방법을 순차적으로 검토하여 각각의 경우에 가장 적합한 열교환을 찾아 나가는 과정을 반복함으로써 목적한 최적 열교환망을 구할 수 있었다.

제안한 방법을 문헌에 실린 열교환망 합성 문제에 적용한 결과 이전의 결과보다 열교환 장치 및 흐름의 분기 등이 감소한 결과를 얻을 수 있었으며 결과적으로 이는 유틸리티 및 장치비의 감소를 가져올 것으로 기대된다.

참고문헌

1. J. Cerda, A.M. Westerberg, D. Mason & B. Linnhoff, "Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis a transportation problem," *Chem. Eng. Sci.*, **38**, 373-387, 1983.
2. W.B. Dolan, P.T. Cummings & M.D. Levan, "Process optimization via simulated annealing: Application to network design," *AIChE J.*, **35**, pp725-736, 1989.
3. C.A. Floudas, A.R. Ciric & I.E. Grossmann, "Automatic synthesis of optimum heat exchanger configuration," *AIChE J.*, **32**, pp276-290, 1986.
4. J.R. Flower & B. Linnhoff, "A thermodynamic combinatorial approach to the design of optimum heat exchanger networks," *AIChE J.*, **26**, pp1-9, 1980.
5. E.C. Hohmann, "Optimum networks for heat exchanger," Ph. D thesis, Univ. of Southern California, 1971.
6. B. Linnhoff & J.R. Flower, "Synthesis of heat exchanger networks," *AIChE J.*, **24**, pp633-654, 1978.
7. B. Linnhoff & E. Hindmarsh, "The pinch design method for heat exchanger networks," *Chem. Eng. Sci.*, **38**, pp745-763, 1983.
8. B. Linnhoff & D.R. Vredeveld, "Pinch technology has come of age," *Chem. Eng. Progr.*, **80**, pp30-40, 1984.
9. A.H. Masso & D.F. Rudd, "The synthesis of system designs: II Heuristic structuring," *AIChE J.*, **15**, pp10-17, 1969.
10. N. Nishida, Y.A. Liu & L. Lapidus, "Studies in chemical process design and synthesis: III A simple & practical approach to the optimal synthesis of heat exchanger networks," *AIChE J.*, **23**, pp77-93, 1977.
11. J.W. Ponton & R.A.B. Donaldson, "A fast method for the synthesis of optimal heat exchanger networks," *Chem. Eng. Sci.*, **29**, pp2375-2377, 1974.
12. S.A. Popoulias & I.E. Grossmann, "A structural optimization approach in process synthesis: II Heat recovery networks," *Comput. & Chem. Eng.*, **7**, pp707-721, 1983.
13. J.L. Su & R.L. Motard, "Evolutionary synthesis of heat exchanger networks," *Comput. & Chem. Eng.*, **8**, pp67-80, 1984.
14. K.K. Trivedi, B.K. O'Neill & J.R. Roach, "A new dual temperature design method for the synthesis of heat exchanger networks," *Comput. & Chem. Eng.*, **13**, pp667-685, 1985.