

## 열교환기 네트워크의 자동합성

오 전 근 · 김 경 미 · 윤 인 섭  
 서울대학교 공과대학 화학공학과

## Automatic Synthesis of Heat Exchanger Networks

Jeon-Keun Oh, Kyung-Mi Kim, En-Sup Yoon

Department of Chemical Engineering, Seoul National University

## Abstract

In this study a s/w system(HENSPIN) for the automatic synthesis of HEN(heat exchanger network) was developed based on Pinch Design Method. The synthesized HEN by HENSPIN are satisfying performance targets such as minimum utility usage with as few as possible capital items.

The invented network is near optimal in capital and operating cost. It will be used as initial structure for evolution to the structure which has optimal operability.

## 1. 서 론

70년대의 석유파동 이후 대규모의 공정산업은 팽창단계에서 정착단계로 이행하고 있다. 최근 화학공정은 효율개선을 통한 생존의 길을 모색하고 있는 가운데 에너지의 효율적 사용에 관한 연구가 본격화되고 있다. 특히 화학공정의 구조를 설계하는 공정합성(process synthesis) 방법을 이용한 공정의 구조최적화 혹은 구조개선이 커다란 에너지절약 효과가 있음을 인식하고 특히 열교환기네트워크(HEN; heat exchanger networks) 합성, 동력시스템 합성, 열통합증류탑 합성 등에 관한 연구가 활발하게 진행되어 80년대 초에 이르러는 실제 공정의 설계 및 개선에 커다란 효과를 거두기 시작하였다.<sup>1,2)</sup>

공정합성은 공정 전체의 구조를 대상으로 최적 구조를 찾는 구조최적화 작업을 주된 영역으로 한다. 이러한 공정구조변경을 통한 최적화를 도모하는 공정합성분야의 노력은 확정된 공정구조에서 조업조건등의 변수최적화의 노력에 비해 비용의 현격한 감소효과를 지닌다.

공정합성 분야중에 HEN 합성은 문제의 복잡성이 그리 크지 않고 경제적 가치도 충분하기 때문에 가장 성숙된 분야의 하나이다. 가장 효과적인 기술로 알려진 Linnhoff 등의 핀치설계방법<sup>1,2,3,4,5,6,7)</sup>에 의해 통상적으로 20%~30%의 에너지 절약이 자본비용의 절감과 함께 실현될 수 있다. 이들의 실제 프로젝트 수행 결과에 의하면 자본회수기간도 보통 12개월 미만이다.<sup>8)</sup>

공정합성에 있어서 최적해는 여러가지 탐색전략(search strategy)에 의해 구해진다. 특히 HEN 합성에 있어서 최적해를 탐색하는 전략에는 휴리스틱(heuristic) 방식과 알고리즘적 방식과 이들을 혼합한 혼성(hybrid) 방식이 여러 사람들의 연구에서 제안되고 있다. 이때 대개의 알고리즘적 과정은 세련되고 수학적이다. 즉 구조최적화문제를 연속적인 변수최적화나 동적계획법(dynamic programming)으로 변형시키려고 한다. 그러나 성질상 알고리즘 방식은 '넓이우선(breadth-first)' 탐색을 하는 경향이 있고 따라서 수많은 대상들의 조합급수적 집합을 전부 평가해야 한다. 그러나 이런 과정은 쓸모없거나 시간낭비적이기 쉽다. 반면에 휴리스틱 탐색방식은 알고리즘적 방식에 비해 반드시 비체계적인 것도 아니면서 '깊이우선(depth-first)' 해를 매우 효과적으로 빠르게 구할 수 있다. 이때의 휴리스틱은 과거의 경험이나 영감뿐만 아니라 기대되는 것<sup>8,9)</sup>이나 Linnhoff<sup>4)</sup>나 Umeda<sup>10)</sup>와 같이 열역학적 해석등의 '제한 엄밀한(semi-rigorous)' 해석의 결과등일 수도 있다. Grossmann<sup>11)</sup>은 위의 열역학적 해석을 통해 탐색영역을 크게 축소시키는 방식을 열역학적목표 접근법으로 따로 분리하고 있다. 휴리스틱 접근법과 열역학적 접근법은 알고리즘적 접근법에 있어서의 뚜렷한 한계와 실패로 인하여 주목을 많이 끌고있고 적용사례도 많다. 그러나 최근에는 "mixed-integer programming" 방법이 알고리즘적 방법의 도구로 사용되면서 HEN의 자동합성시

시스템이 Floudas<sup>12)</sup> 등에 의해 개발되기에 이르렀다.

그러나 이 시스템에서도 열역학적 해석을 통해 탐색 영역을 현격히 줄인후 가능한 몇개의 구조를 알고리즘적으로 탐색하는 일종의 혼성 접근법이다.

HEN을 위의 여러 방식으로 설계하여 실제상의 필요에 의해 보다 실제에 적합한 구조로 전개 (evolution)시킬 수 있다. 구조의 최적성을 판단함에 있어서는 경제성과 에너지 효율등 뿐만 아니라 조업상의 공정의 융통성 (flexibility), 제어가능성 (controllability), 신뢰도 (reliability), 안전도 (safety) 등의 조업도 (operability)를 좋게 유지하는가를 고려해야 한다. 그런데 열교환기의 초기설계가 위의 조건들을 만족시키기가 어려우므로 필연적으로 초기구조를 기본으로 전개시키는 전개전략이 필요하다. 특히 HEN의 조업도 향상을 위해 Morari 등과 Linnhoff 와 Kotjabasakis<sup>13)</sup> 등의 연구가 상당한 진전을 보이고 있다.

## 2. 연구의 범위

최적의 HEN합성이란 어떠한 공정에 있어서 냉각되어야 할 온류와 가열되어야 할 냉류가 있을때 가열 및 냉각을 수행하는 HEN을 구성하되 소요비용이 최소가 되도록 구성하는 것이다. 이때 소요비용은 주로 유틸리티 (steam, electricity, fuel, water 등)의 사용량, 장치수, 열교환면적에 관계된다. 최적의 HEN합성에 관한 여러접근법중 열역학적 목표 접근법인 Linnhoff 등에 의한 핀치설계방식은 설계자가 간단한 손계산으로 열역학적 목표를 설정하고 '가능성판별법 (feasibility criteria)'을 만족하는 네트워크를 시행오차 방식으로 결정을 하게 되어있다.

본 연구에서는 우선 이러한 핀치설계방식을 프로그래밍하여 자동적으로 최적의 HEN을 합성하는 시스템을 개발한다. 이때 구성되는 네트워크는 최소 유틸리티와 최소 장치수를 만족시킨다. 따라서 구성된 HEN의 최적성 (optimality)을 따져볼때 이것이 모든 경우의 수를 고려한 알고리즘적 최적화가 아니라 일종의 휴리스틱인 열역학적 목표를 만족시킴으로써 최적에 가깝게 설계되는 것이다. 열교환기수의 증가는 소요비용의 급격한 증가를 가져오므로 유틸리티 사용량과 장치수만 최소화시킬 때에도 거의 최적에 가까운 HEN이 설계된다고 알려져 있다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에도 열교환면적의 최소화는 포함하지 않는다. 이는 보완적으로 연구될 알고리즘적 최적화와 조업도 (operability) 향상을 위한 전개전략에 관한 연구에서 포함시킬 예정이다.

## 3. 핀치설계방법에 의한 HEN 합성

### 3.1. 핀치의 위치 및 의미

공급온도 (TS) 에서 목적온도 (TT) 까지 냉각시켜주어야할 두개의 온류 (hot stream) 와 공급온도에서 목적온도까지 가열시켜주어야할 두개의 냉류 (cold stream) 가 있는 "test case no.3" 문제<sup>6)</sup>가 Table 1에 나와있다. 여기에는 열교환기내에서 온류와 냉류

Table 1. Stream Data for Test Case No.3

STREAM NUMBER AND TYPE	SUPPLY TEMP (TS) (°C)	TARGET TEMP (TT) (°C)	HEAT CAPACITY FLOWRATE (FCP) (kW/°C)
HTST 1	150	60	2.0
HTST 2	90	60	8.0
MTST 3	125	100	2.5
MTST 4	25	100	3.0

$\Delta T_{min} = 20^\circ\text{C}$

의 서로 접근될 수 있는 가장 작은 온도차인 최소 접근온도 ( $\Delta T_{min}$ )가 정해져 있고 각각의 흐름들에 대하여 열용량과 흐름량의 곱한 값인 열용량 흐름량 (FCP; heat capacity flowrate)이 주어져 있다. 이때 대부분의 경우 연구자들은 FCP가 일정하다는 가정을 한다.

위의 온류들과 냉류들에 대해 '합성 온도 - 엔탈피' 곡선이 Fig.1과 같이 그려진다. 이때 온류와 냉류의 합성곡선이 서로 가장 가깝게 근접한 점이 온도 핀치를 나타낸다. 또한 이 합성곡선의 기울기는 합성열용량흐름량  $\sum FCP$ 의 역수이다. 이 사실에서 볼때 핀치근방에서 우리는 다음과 같은 관계를 추론할

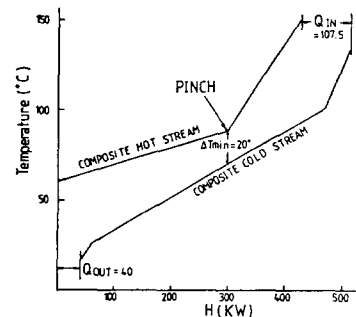


Fig.1. Composite Temperature-Enthalpy Curves.

수 있다.

핀치부근의 핀치상단 (above pinch)에서는

$$\sum_{p^+} FCP_c > \sum_{p^+} FCP_h \quad (1)$$

핀치부근의 핀치하단 (below pinch)에서는

$$\sum_{p^-} FCP_h > \sum_{p^-} FCP_c \quad (2)$$

이 된다. 이 때  $p^+$ 는 핀치 바로 상단,  $p^-$ 는 핀치 바로 하단을 의미하고 하첨자  $h$ 는 온류,  $c$ 는

냉류를 의미한다. (1), (2)의 조건은 핀치를 찾는 데의 필요조건이 된다. 또한 이 조건은 핀치점을 탐색하는데 있어서의 탐색영역을 현격히 줄이는데 효과적이다. Fig.1에서 냉류와 온류의 합성곡선이 수평이동하여 가장 근접한 부분이 최소접근온도 ( $\Delta T_{min}$ )가 되었을 때  $Q_{in}$ 과  $Q_{out}$ 는 네트워크 구성시 필요로 하는 최소가열량과 최소냉각량을 나타낸다. 이러한 조건을 만족시키는 최소 유틸리티 소비의 HEN을 다음의 핀치설계방법을 이용하여 구성할 수 있다.

### 3.2. 핀치설계방법

최소 유틸리티 소비의 HEN을 설계하기 위해서는 구성된 HEN내에서 Fig.2와 같은 현상이 일어

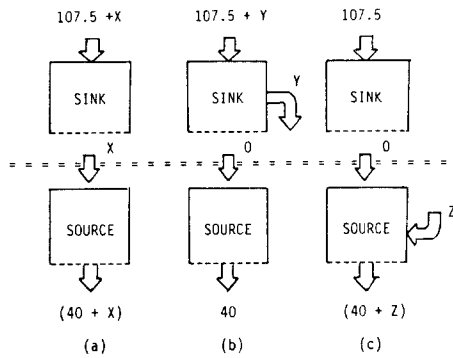


Fig.2. The Causes of Increased Utility Usage.

나지 않도록 해야 한다. 즉 핀치를 통해서 열이 흐르거나 핀치 상단부에서 냉각을 하거나 핀치 하단부에서 가열을 하게 되면 유틸리티의 낭비를 초래하게 된다. 이 개념이 핀치설계방법의 기본적 원리이다. 이 개념이 없이는 최적의 시스템 구조를 만들려 해도 항상 최적의 해를 구할 수 없게 된다.

HEN의 최적합성을 위해서는 유틸리티 비용뿐만 아니라 자본재비용도 감소시키는 것이 중요하다. 이를 위해서는 장치수를 최소화한다. 왜냐하면 최소수보다 많은 장치는 더 많은 장소, 파이프 네트워크, 주변장치, 유지비용등을 필요로 하여 자본재 비용의 커다란 계단적 증가를 가져오기 때문이다.<sup>6)</sup> Hohmann<sup>14)</sup>은 HEN 공정에 필요한 장치의 가최소수(quasi-minimum number)는 다음과 같다고 정의하였다.

$$U_{min} = N_{source} + N_{sink} - 1 \quad (3)$$

핀치설계방법은 네 개의 주요 부분으로 구성되어 있다. 이는 '원리(philosophy)', '가능성판별법(feasibility criteria)', '소거원칙(tick-off heuristic)', '나머지 설계방법(remaining problem)'이다. 이에 관한 구체적인 내용은 Linnhoff<sup>6)</sup>등의 논문에 상술되어 있다.

### 3.3. 엑서지(exergy) 손실의 최소화

엑서지(available energy)는 계가 정의된 주위의 상대적 상태와 열역학적 평형에 도달할 때까지 가역적으로 뽑아낼 수 있는 일의 최대량으로 정의 된다. 만일 계가 상태 1에서 상태 2로 바뀌게 되면 이때의 엑서지 손실은 다음 식으로 나타내진다.<sup>15)</sup>

$$Ex_{irr}(-\Delta B) = - \int_{Q_1}^{Q_2} (1 - T_0/T) dQ \quad (4)$$

엑서지 손실은 Carnot 효율에 대한 열량 Q를 온류와 냉류에 대해 합성곡선을 그렸을 때 Fig.3에서와 같이 빗금친 부분의 면적에 해당한다.

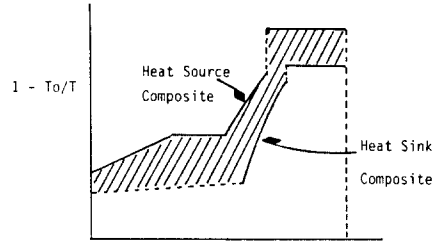


Fig.3. Exergy Loss of the Streams in process.

핀치를 통해 열전달이 생기는 경우인 Fig.2(a)는 온도  $T_b$ 인 뜨거운 유틸리티가 X만큼 온도  $T_c$ 인 차가운 유틸리티로 바뀐것을 의미하고 이때의 엑서지 손실은 다음 식으로 추산된다.

$$Ex_{irr} = T_0 \left( \frac{T_b - T_c}{T_b T_c} \right) X$$

따라서 핀치설계방법으로 가능한 열손실 X를 영으로 만드는 것은 엑서지 손실을 줄이는 것이고 다시말하면 공정의 가역도(reversibility)를 증대시키는 것이다. 더욱더 공정의 엑서지 손실을 감소시키기 위해서는 다음과 같은 사항이 제안될 수 있다.

첫째, 공정의 조건인 열원과 열소모부분의 에너지 수준을 바꾼다. 이는 공정의 조업조건이나 흐름조건 중 온도나 압력을 변화시키는 것이다. 이는 Fig.3에 있어서 합성곡선의 모양을 변화시켜 빗금친 부분의 면적을 줄이는 노력에 해당한다. 둘째, 값비싼 유틸리티를 유틸리티 핀치를 설정하여 값싼 유틸리티로 대체시킨다. 엑서지는 유틸리티의 질에 상관없이 있다. 예를 들면 HP(high pressure) 증기는 같은 열량을 지닌 LP(low pressure) 증기나 IP(intermediate) 증기에 비해 많은 엑서지를 지니고 있어 비싸다. 따라서 만일 HP 증기를 사용하던 공정을 같은 열량을 지닌 IP 증기나 LP 증기로 대체시키면 공정의 엑서지 손실은 감소되는 것이다.

그런데 대부분의 경우 시스템이 높은 에너지 효율을 갖기 위해서는 그러한 시스템구조를 위한 자본재 비용이 증대된다. 예를 들어 유틸리티 핀치를 설정하여 엑서지 손실을 감소시키려고 하면 장치수는 증가

하게 된다. 따라서 최적의 HEN 합성을 위해서는 에너지 효율과 자본재비용간에 "trade-off"를 고려해야 한다.

#### 4. HEN 합성시스템 - HENSPIN

본 연구에서 개발된 HENSPIN(heat exchanger network synthesis system using pinch design method)은 핀치설계방식에 기초를 두어 최소의 유틸리티와 가능한한 최소의 장치수를 사용하는 네트워크의 합성을 위한 컴퓨터 프로그램이다. HENSPIN은 네개의 주요부분으로 구성되어 있다.

(1) 핀치 (pinch) 단계에서는 핀치의 위치가 Linnhoff의 온도구간 해석법인 '문제 테이블' 알고리즘을 응용하여 결정된다. 그리고 구성될 HEN의 최소의 유틸리티 필요량이 계산된다.

(2) 분해 (decomposition) 단계에서는 냉류와 온류가 핀치상단과 핀치하단으로 핀치를 중심으로 분해되고 최소장치수가 계산된다.

(3) 필수결합 (essential match) 단계에서는 핀치근방에서의 '필수결합'들이 '가능성 판별법'을 이용하여 결정된다.

(4) 설계 (design) 단계에서는 먼저 필수결합들에 대해 '소거원칙'을 적용하여 열용량이 할당된다. 그리고 분할된 흐름에 대해 FCP가 재할당되고 '나머지 결합'들을 정하고 각각에 열용량이 할당되어 흐름들이 차례로 소거된다. 그런후 아직 목표온도를 만족시키지 못하는 흐름에 대해 가열기와 냉각기를 붙여 최종적으로 HEN 설계가 완성된다.

HENSPIN 시스템의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 원래 핀치설계방법은 손계산에 기초한 접근법이기 때문에 복잡한 계산을 피하기 위해서 FCP가 일정하다는 가정을 하고 있다. 그러나 이러한 가정은 때때로 잘못된 핀치점을 찾게하여 HEN 설계에 있어서의 오류를 발생시킬 가능성이 높다. 따라서 HENSPIN은 흐름을 작은온도 구간으로 분할하여 그 구간마다 다르게 FCP를 할당할 수 있게 하므로써 이 문제를 극복할 수 있게 하였다.

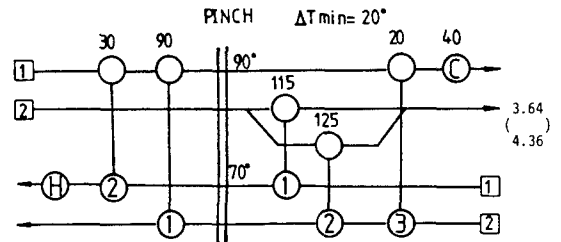
(2) 핀치설계방식의 '가능성 판별법'은 결합을 결정해 주는 것이 아니라 결합의 가능성만을 판별시켜줄 뿐이다. 따라서 결합의 자동적 결정을 위해서는 보다 구체적인 휴리스틱이 있거나 여러가지 가능한 대상들을 NLP(non-linear programming) 등으로 최적화하는 과정이 필요하다. HENSPIN은 필수결합들을 필수결합할 온류와 난류를 FCP 크기순에 따라 결정한다. 이러한 휴리스틱을 사용한 이유는 HEN에서 열교환 '추진력 (driving force)'을 균배하기 위

함이다. 본 시스템은 분할될 흐름으로는 분할 가능한 후보흐름중 큰 FCP를 지닌것이 차례로 선택된다. 또한 분할된 흐름의 분할되어 할당될 FCP의 양은 결합하는 상대편 흐름들중의 분율에 비례하여 결정된다. 이것도 역시 열교환 추진력의 균배에 목적이 있다. HEN에서 열교환 추진력이 균배되면 필요로 하는 열교환 면적이 줄어들어 경제적이다.

#### 5. HENSPIN의 적용 및 검토

HENSPIN은 다음과 같은 데이터를 입력해야 한다. (1)  $4T_{min}$  (2) TS, TT, FCP (3) 흐름의 이름, 분할된 온도구간 수 (4) NC, NH (5) 열량과 온도의 단위

Table 1에 흐름데이터가 나와있는 "test case no. 3" 문제에 HENSPIN이 적용되어 Fig.4와 같은 네



트워크가 합성되었다. 이 네트워크는 Linnhoff<sup>6)</sup> 등의 결과와 일치하고 있다. 이때 공정의 최소장치수는 5개인데 핀치설계를 하였을 경우 이보다 2개 많은 7개의 장치가 필요하다. 이때 7개 미만으로 장치수를 줄이려 하면 항상 핀치를 통해 열전달이 생겨 유틸리티의 소비가 증대된다. 이는 Fig.1의  $4T_{min}$  값이 커지게 되는 효과와 같다.

기존 정유공장 (oil refinery)의 원유 예열공정인 Fig.5에 도시되어 있다. 또한 Table 2와 Table 3

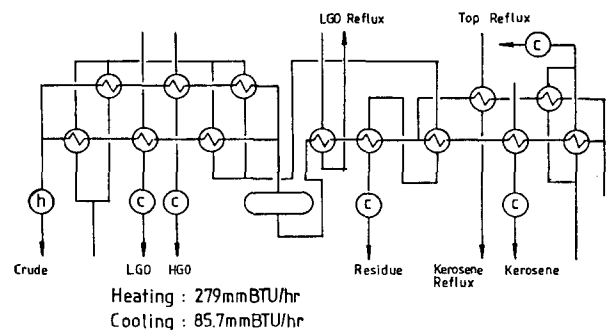


Fig.5. Preheat Train in an Oil Refinery.

Table 2. Stream Identification Table 3. Stream Data 1 for Preheat Train.

Stream	Identification
Crude	CDST 1
Residue	HTST 1
HGO	HTST 2
LGO	HTST 3
HGO Reflux	HTST 4
Kerosene Reflux	HTST 5
Kerosene	HTST 6
Top Reflux	HTST 7

STREAM NUMBER AND TYPE	SUPPLY TEMP (°F)	TARGET TEMP (°F)	HEAT CAPACITY FLOWRATE (FCP) MM BTU/HR°F
HTST 1	608.0	489.0	0.577
HTST 1	489.0	411.0	0.533
HTST 1	411.0	360.0	0.504
HTST 1	360.0	302.0	0.479
HTST 1	320.0	208.0	0.422
HTST 2	438.0	79.0	0.160
HTST 3	586.0	118.0	0.030
HTST 4	469.0	288.0	0.187
HTST 5	343.0	243.0	0.237
HTST 6	297.0	84.0	0.100
HTST 7	250.0	142.0	0.410
CDST 1	77.0	210.0	0.752
CDST 1	210.0	230.0	0.819
CDST 1	230.0	268.0	0.858
CDST 1	268.0	327.0	0.894
CDST 1	327.0	410.0	0.959
CDST 1	410.0	621.5	1.275

$\Delta T_{min} = 20^\circ F$

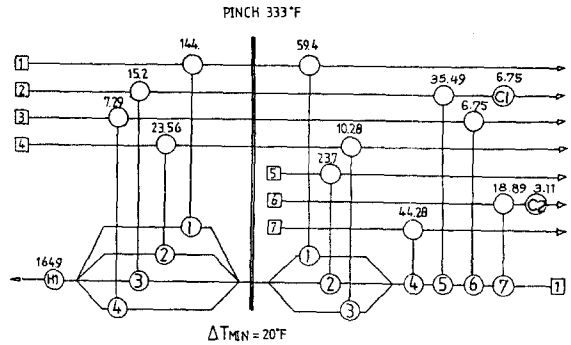


Fig.6. Minimum Utility Usage Design for Preheat Train by HENSPIN with Data 1 in Table 4.

에는 흐름의 이름과 흐름의 조건이 나타내져 있다. 이때 Crude와 Residue 흐름은 공급온도에서 목표온도까지 온도차가 커서 FCP의 변화가 크기 때문에 몇개의 온도구간으로 나누어 FCP를 정하였다.

이 기존공정에 대하여 HENSPIN을 사용하여 새로 예열망을 합성한 결과를 격자표현방식으로 Fig.5에 나타냈다. 기존 HEN의 가열기의 필요열량이 시간당 279million BTU인데 비해서 새로 합성된 HEN은 시간당 164.9 million BTU의 열량이 가열기에서 필요하다. 따라서 새로 합성된 본 예열망은 이상적인 경우 40%의 기존 가열량이 절감될 수 있다.

합성된 공정의 타당성을 검토하기 위해서 기존 공정과 새로운 공정을 공정모사기 ASPEN PLUS로 모사하였다. 기존 공정의 모사를 통해 모사기의 타당성을 확인한후 합성된 공정을 모사한 결과 중에서 유틸리티 사용량에 대해 Table 4에서 비교하였다.

Table 4. Utility Usage in Existing Process and newly synthesized process.

	Existing process		Synthesized process	
	operating conditions	simulation (ASPEN)	synthesis (HENSPIN)	simulation (ASPEN)
Heating	279	279	164.9	168.53
Cooling	85.7	109.47	9.86	29.67
Energy conservations			114.1 (40%)	110.4 (39%)

HENSPIN에 의해 합성된 네트워크의 필요가열량을 볼 때 HENSPIN에 의해 간단히 계산된 결과가 이 HEN을 다시 ASPEN PLUS로 상세하게 모사한 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이로써 HENSPIN이 합성하는 HEN이 타당성이 있음을 확인하였다. Fig.6에서 핀치하단의 장치수는 모두 9개로 최소장치수보다 한 개가 많다. 만일 흐름 2를 소거(tick-off) 하기 위해 열교환기 5에 흐름 2의 열량을 전부 할당

하면 열교환기 내에서 냉류와 온류의 온도가 교차한다. 이러한 열교환기를 설계하는 것은 열역학적으로 불가능하다. 따라서 HENSPIN은 이러한 경우  $\Delta T_{min}$  제한을 어기는 열교환기의 용량을 줄이고 장치를 추가하여 줄어든 열용량이 할당된다. 여기서 장치수가 늘어나게 된 원인은 핀치단계의 결과를 볼때 100 F에서 생기는 열흐름의 병목이 핀치와 비슷하게 작용하고 있기 때문이다.

Table 5는 종래의 방식대로 FCP가 일정하다고 하는 데이터이다. 이 데이터를 HENSPIN에 입력하여

Table 5. Stream Data 2 for Preheat Train.

STREAM NUMBER AND TYPE	SUPPLY TEMP (°F)	TARGET TEMP (°F)	HEAT CAPACITY FLOWRATE (FCP) MM BTU/HR°F
HTST 1	608.0	280.0	0.526
HTST 2	438.0	79.0	0.160
HTST 3	586.0	118.0	0.030
HTST 4	469.0	288.0	0.187
HTST 5	343.0	243.0	0.327
HTST 6	297.0	84.0	0.100
HTST 7	250.0	142.0	0.419
CDST 1	108.0	621.5	0.890

$\Delta T_{min} = 20^\circ F$

적용한 결과를 온도변화에 따른 FCP의 변화를 고려한 앞의 결과와 Table 6에서 비교하였다. 이 비교

Table 6. The Change of Pinch Topology to FCP Variations.

		Data 1	Data 2
Pinch Temp.		333.0	428.0
Essential Matches	Below Pinch	{ 1, 1.0 } { 5, 1.1 } { 4, 1.2 }	{ 1, 1.0 } { 4, 1.1 } { 2, 1.2 } { 3, 1.3 }
	Above Pinch	{ 1, 1.0 } { 4, 1.1 } { 2, 1.2 } { 3, 1.3 }	{ 1, 1.0 } { 1, 1.1 } { 3, 1.2 }
	Heater Duty	164.9	84.7
	Cooler Duty	9.86	29.91
Number of Unit	Below	5	4
	Above	8	8
Energy Savings	Heating	114(40%)	
	Cooling	75.9(88%)	

에서 볼수 있듯이 합성된 HEN의 구조가 상이함을 알 수 있다. 이렇듯 온도변화에 따른 열용량의 변화를 고려하는 것이 실제 공정의 설계에서는 중요하다.

열교환 면적의 최소화를 위하여 HENSPIN과 같이

열교환 추진력을 균배시키기 위한 휴리스틱을 도입하지 않고 mixed-interger 프로그래밍 기법등을 사용한 면적을 포함하는 목적함수를 최적화 할 수도 있다. 혹은 HENSPIN에 의해 설계된 구조중 흐름의 분할이 있는 곳을 HEXATRAN 등을 이용하여 면적이 최소가 되도록 흐름량을 할당할 수도 있다.

그러나 HENSPIN에 의해 합성된 HEN을 일단 자본재 비용과 조업비용(주로 에너지)의 면에서는 최적에 가깝다고 간주하여도 무방하다. 또한 이 HEN을 초기구조로 이용하여 조업도비용(생산고, 생산품 순도 등)의 감소를 위한 조업도(operability)향상 전개전략이 마련되므로써 최적의 HEN 자동합성 시스템이 보다 완전해질 것으로 보인다.

## 6. 결 론

본 연구를 통하여 HENSPIN은 HEN합성을 자동적으로 수행할 수 있음을 보였다. 이때 합성된 네트워크는 최소의 유틸리티를 소비하면서 가능한한 최소의 장치수를 사용하도록 구성된다.

이 HENSPIN을 기존의 정유공정 예열망에 적용하여 본 결과 새로 합성된 네트워크는 이상적인 경우 기존 가열량의 40%인 시간당 114 million BTU를 절약할 수 있다. 이 합성된 네트워크를 일반목적 공정모사기인 ASPEN PLUS로 모사하여 그의 타당성을 확인하였다.

## NOMENCLATURE

B	: the exergy, kw
$\Delta B$	: change of the exergy, kw
FCP	: the heat capacity flowrate of a stream, kw/°C
FCPC	: the heat capacity flowrate of a stream, kw/°C
FCPH	: the heat capacity flowrate of a stream, kw/°C
HP	: high pressure
IP	: intermediate pressure
LP	: low pressure
NC	: number of cold streams and cold stream branches
NH	: number of hot streams and hot stream branches
Nsink	: number of cold streams and cooling utilities
Nsource	: number of hot utilities and heating utilities
dQ	: enthalpy change, kw
Qin	: entering enthalpy, kw
Qout	: leaving enthalpy, kw
T	: temperature
To	: surrounding temperature
dT	: small change in temperature
TS	: stream supply temperature
TT	: stream target temperature

$\Delta T_{min}$	: the minimum allowed temperature approach in an exchanger, heater or cooler, °C
U	: overall heat transfer coefficient, kw/m °C
Umin	: the minimum number of units
X,Y,Z	: heat flow, kw

## REFERENCES

1. Linnhoff, B. and J. A. Turner, "Simple Concepts in Process Synthesis Give Energy Savings and Elegant Designs," Chem. Engr. December, 742(1980)
2. Linnhoff, B. and J. A. Turner, "Heat-Recovery Networks: New Insights Yield Big Savings," Chem. Engr. November, 56(1981)
3. Hindmarsh, E., D. Boland and D. W. Townsend, "Maximizing Energy Savings for Heat Engines in Process Plants," Chem. Engr. February, 3(1983)
4. Linnhoff, B. and J. R. Flower, "Synthesis of Heat Exchanger Networks," AIChE J. 24, 633(1978)
5. Linnhoff, B. and B. W. Townsend, "Designing Total Energy Systems," CEP July, 72(1982)
6. Linnhoff, B. and E. Hindmarsh, "The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks," CES 38, 745(1983)
7. Tjoe, T.N. and B. Linnhoff, "Using Pinch Technology for process Retrofit," Chem. Engr. April, 47(1986)
8. Boland, D. and B. Linnhoff, Chem. Engr. April, 222(1979)
9. Ponton, J. K. and R.A.B. Donaldson, "A Fast Method for the Synthesis of Optimal Heat Exchanger Networks," CES 29, 2375(1974)
10. Umeda, T., K. Niida and K. Shiroko, "A Thermodynamic Approach to Heat Integration in Distillation Systems., AIChE J. 25, 423(1979)
11. Grossmann, I. E., "Mixed-Integer Programming Approach for the Synthesis of Integrated Process Flowsheets," Computers and Chem. Engr. 9, 463(1985)
12. Floudas, C. A. and C. E. Grossmann, "Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations," AIChE J. 32, 276(1986)
13. Linnhoff, B. and E. Kotjabasakis, "Downstream Paths for Operable Process Design," CEP May, 23(1986)
14. Hohmann, E. C., "Optimum Networks for Heat Exchange," Ph.D. Thesis, University of Southern California, (1971)
15. Chou, C. C. and K. T. Chang, "A Bright Idea Toward Optimal Process Design," J. The Chinese Institute of Chem. Engr. 14, 469(1983)