

## 납사분해 공정 내 열 교환 네트워크 경제적-환경영향 평가

정호진 · 정수빈 · 안유찬<sup>†</sup>

계명대학교 화학공학전공  
42601 대구광역시 달서구 달구벌대로 1095  
(2023년 5월 8일 접수, 2023년 6월 20일 수정본 접수, 2023년 6월 28일 채택)

## Evaluation of Economic-Environmental Impact of Heat Exchanger Network in Naphtha Cracking Center

Hyojin Jung, Subin Jung and Yuchan Ahn<sup>†</sup>

School of Chemical Engineering, Keimyung University, 1095, Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu, 42601, Korea  
(Received 8 May 2023; Received in revised from 20 June 2023; Accepted 28 June 2023)

### 요 약

석유화학은 전체 산업에너지 소비량 중 약 30%를 소비하는 에너지 다소비 업종으로써 대표적인 이산화탄소(carbon dioxide, CO<sub>2</sub>) 배출원이다. 그 중 에틸렌, 프로필렌, 프로판 및 혼합 C4를 생산하는 납사 분해 공정(naphtha cracking center, NCC)은 많은 양의 에너지를 소비하고 상당한 양의 CO<sub>2</sub>를 배출한다. 이러한 이유로 경제성과 환경적 측면에서의 효율성을 보장하기 위해 에너지 사용량 및 환경 영향 인자 감소를 목표로 하는 통합 기술경제적-환경영향 평가가 필요하다. 본 연구는 편지분석에 근거하여 기존 NCC에서 사용되는 열 교환망의 효율성을 분석하고 이를 통해 에너지 사용량을 감축시킬 수 있는 개선안을 선정하는 것을 목표로 한다. 공정 내 유틸리티 소비량을 줄이기 위하여 고온 스트림과 저온 스트림 사이를 고려한 최적의 열 교환망을 도출하고, 유틸리티 사용량 감소와 열교환기 설치 비용 증가 사이의 트레이드 오프를 고려하여 경제성 평가를 진행하였다. 또한, 환경적 측면을 고려하여 감소된 CO<sub>2</sub> 배출에 대한 환경영향평가를 실시하였고, 경제적-환경 영향 평가는 투자된 자금을 회수하는 회수기간을 사용하여 실제 공정을 바탕으로 적용 가능성이 있는 에너지 절감안을 도출하였다. 경제적-환경영향평가를 고려한 결과 경제성만을 고려한 부분에서는 각 사례별로 4.29개월, 3.21개월, 3.39개월로 나타났고, 경제적-환경 통합 평가의 경우에는 각 사례별로 4.24개월, 3.17개월, 3.35개월로 각각의 회수기간을 보였다. 이러한 결과는 환경영향평가를 포함하지 않았을 때와 포함하였을 때 모두 동등하게 나타났다. 추가로 주요한 요소가 회수기간에 어느정도 영향을 미치는지 확인하기 위해 각 사례별 민감도 분석을 진행하였다. 민감도 분석결과 열 교환기 비용이 전체적인 비용에 영향을 미치는 주요 원인으로 확인되었다.

**Abstract** – Petrochemical is an energy consuming industry that consumes about 30% of total industrial energy consumption and is a representative carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission source. Among them, the Naphtha Cracking Center (NCC), which produces ethylene, propylene, propane and mixed C4, consumes large amounts of energy and emits significant amounts of CO<sub>2</sub>. For this reason, an integrated techno economic- environmental impact assessment aimed at reducing energy consumption and environmental impact factors is necessary to ensure efficiency in terms of economics and environment. This study aims to analyze the efficiency of the heat exchanger network used in the existing NCC base on the pinch analysis and select an improvement plan that can reduced energy consumption. In order to reduces the utility consumption in the process, an optimal heat exchanger network considering the high-temperature and low-temperature stream was derived, and the economic evaluation was conducted by considering the trade-off between the reduction in utility consumption and the increase in heat exchanger installation cost. In addition, an environmental impact assessment was conducted on the reduced CO<sub>2</sub> emission in consideration of the environmental aspect, and the economic environmental impact assessment used the payback period to recover the invested funds to come up with an energy saving plan that can be applied based on the actual process. As a result of considering the economic-environmental impact assessment, when the environmental impact assessment was not considered, it was 4.29 months, 3.21 months,

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yuchan.ahn@kmu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

and 3.39 months for each case, and when considering the environmental impact assessment, it was 4.24 months, 3.17 months, and 3.35 months for each case. These results appeared equally both when the environmental impact assessment was not include and when it was include. In addition, a sensitivity analysis was conducted for each case to determine how important factors affect the payback period. As a result of the sensitivity analysis, the cost of the heat exchanger was identified as a major factor influencing the overall cost.

Key words: Petrochemical process, NCC, Energy-saving, Pinch Analysis, HEN

## 1. 서 론

에틸렌은 석유화학 산업에서 다양한 합성수지의 원료(예, 고밀도 폴리에틸렌[1], 저밀도 폴리에틸렌[2], 직쇄상 저밀도 폴리에틸렌 [3]등으로 사용되는 가장 기본적인 유기화합물이다[4]. 에틸렌은 무색의 기체로 끓는 점이 낮고 탄소-탄소 이중결합을 가지고 있어 화학적 이용과 응용에서 대부분의 유기화합물보다 더 뛰어난 장점을 가지고 있어 석유화학산업에서 에틸렌을 고효율로 얻기 위해서 에틸렌을 생산하는 방법이 아주 중요하게 여겨지고 있다. 석유 화학산업에서 에틸렌을 생산하는 방법으로는 여러가지가 있는데 대표적인 방법으로는 원유에서 정제된 나프타를 열분해하는 납사 분해 공정(Naphtha Cracking Center, NCC), 천연가스 및 셰일가스에서 추출한 에탄을 이용한 에탄 크래킹 공정, 그리고 석탄 합성가스를 원료로 화학물질을 생산하는 올레핀 공정이 있다[5]. 그 중에서 NCC 공정은 여러 석유화학 공정 중 고온에서 운전되는 대표적인 열분해 반응기로, 다운 스트림 올레핀(예, 에틸렌, 프로필렌 등)과 방향족 화합물(예, 벤젠, 톨루엔, 자일렌 등)을 광범위하게 제공 할 수 있다는 장점을 가지고 있다[4]. 그러나 NCC 공정 내 열분해 반응기는 고온에서 작동되어야 하기 때문에 에너지 다소비 공정을 많이 보유하고 있는 석유화학산업에서 지속 가능성을 보장하려면 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는 방안이 필요하다[6]. 석유화학 산업내 에너지 다소비 공정의 에너지 효율 향상은 화학 공정의 경제적 목표를 달성함과 동시에 공정 운전시 배출되는 환경 오염인자(예, carbon dioxide, CO<sub>2</sub>)를 최소화하는 등 환경문제를 동시에 해결하기 위한 중요한 수단이기때문에 이와 관련하여 에너지 다소비 공정의 에너지 효율을 높이기 위한 다양한 기술들이 연구되고 있다[7].

에너지 다소비 공정의 에너지 효율 향상을 위한 최적의 전략은 두가지 주요 목표를 가지고 있다: 1) 에너지 소비 비용 절감, 2) 환경 보존. 두 가지 목표 중 첫번째인 에너지 소비 비용 절감을 목표로 진행한 여러 연구들이 있다.

석유화학산업에서 올레핀을 생산하는데 상당히 많은 양의 에너지가 소비되고 있다는 단점을 극복하기 위하여 Pedram[8]은 올레핀을 생산하는 석유화학공정 내 멤브레인 공정을 추가하여 동시에 올레핀을 생산하는 하이브리드 공정에 대하여 연구를 진행하였다. 멤브레인 공정은 막의 오염으로 인한 짧은 수명, 다른 공정 대비 낮은 회수율, 낮은 선택도 및 높은 멤브레인 제조 비용을 포함한 몇 가지 단점을 가지고 있지만, 석유화학 공정대비 멤브레인 공정에서는 상전이가 발생하지 않아 에너지 소비 감소 효과를 얻을 수 있고, 멤브레인 공정은 공정의 단순성, 작동 용이성, 낮은 유지 보수 비용 등 긍정적인 요소를 가지고 있어 석유화학 공정과 멤브레인 공정을 하이브리드 시스템으로 운영 시 좋은 결과를 얻을 수 있다. Pedram[8]은 기존 올레핀 공정대비 멤브레인 하이브리드 시스템은 C3 분리에 중점을 두고 올레핀-파라핀 분리를 위해 하이브리드 시스템을 다양한 구성으로 배치하여 구성을 분석하고자 하였다. 결과적으로 전체

공정의 총 17.1% 비용 절감과 에너지 요구량을 절반으로 줄일 수 있었다[8]. 이와 같이 기존 공정에 다른 공정을 결합한 전 략을 이용하여 에너지 소비를 줄이는 연구는 다수 진행되어 왔다[9,10]는 에탄에서 에틸렌을 분리하고 C4혼합물에서 부타디엔을 분리하기 위해 가스 분리막과 기존 증류법을 결합한 하이브리드 멤 브레인 공정에 대하여 기술경제적 타당성을 평가하였다. 에틸렌/에 탄 분리의 경우 에틸렌에 대한 막 선택성이 >60이면 에너지 절약이 가능하고, 선택성이 높을수록 더 많은 에너지를 절약할 수 있다. 그 들은 20% 에너지 효율을 증가하기 위해선 275의 선택도가 필요함 을 보여 주었으며, 올레핀에서 부타디엔을 분리하기 위해선 막 선택 도가 7.4일 때 에너지 소비를 23% 줄일 수 있다는 결과를 도출하였 다[9,10]. 이처럼 기존 공정에 다른 공정을 통합하여 하이브리드 시 스템을 구축하는 경우는 사용되는 에너지를 두 공정에서 사용하는 전략으로 인하여 에너지 효율을 증가시킬 수 있다는 장점을 지닌 반면에 다른 공정에 대한 시스템 구축은 많은 투자 비용이 필요하 다는 단점이 존재한다. 그리하여 이러한 단점을 보완하는 다른 개 선 방안으로는 공정내에서 사용되는 촉매를 변화시켜 공정의 에너 지 효율을 증가시키는 많은 연구 또한 진행되고 있다.

촉매 분해는 훨씬 더 적은 에너지 비용과 CO<sub>2</sub> 배출 및 바이오매 스 분해로 원하는 올레핀 수율을 얻기 위한 나프타 분해의 대체 기 술로 제안되고 있다. 경질 나프타의 분해는 800 °C 이상에서 이루 어지지만 분해 공정에서 촉매를 사용하여 작동 온도를 600~700 °C 로 낮추어 총 에너지 소비량이 10~20%가 감소됨을 볼 수 있었다. 이를 바탕으로 Hen et al.은 다양한 제올라이트 촉매에 대한 기공구 조와 반응온도를 촉매분해 활성의 주요인자로 고려하여 나프타 분 해에서 촉매 활성을 분석하기 위해 탄소 나노튜브를 사용하여 500~700 °C에서 작동하는 계층 구조의 ZSM-5를 제안하여 탄소 나노 튜브 활성도(5, 13, 10 wt%)에 따라 에너지 소비량이 10~20% 감소 함을 보여주었다[11]. 이러한 연구는 기존 공정에 많은 변화를 주지 않고 사용하는 촉매를 교체해 공정의 에너지 효율을 향상시키는 효과 를 가져왔다. 그러나 이러한 전략 역시 운영되고 있는 공정에 변화 를 주는 방법이므로 기존 공정에 영향을 주지 않고 에너지 효율을 향 상시킬 수 있는 방안에 대한 관심이 많이 존재하였다.

석유화학 공정에서 기존 공정 내 화학 반응에 영향을 주지 않고 공정의 에너지 소비를 줄일 수 있는 또 다른 방법은 핀치분석에 근 거한 열 교환 네트워크의 합성이다[12]. 열 교환 네트워크의 합성 방법으로는 크게 두가지로, 1) 수학적 방법과 2) 핀치분석. 두가지 방법 중 첫번째 수학적 방법은 목적함수의 최소화를 만족시키는 다 양한 equality 또는 inequality constraints로 이루어지는데, 이 방법 이 산업체에 적용되기 위해서는 대규모 최적화 계획이 요구되기 때 문에 모델의 크기가 매우 증가한다는 어려움이 있다. 또한, 열 교환 망을 나타내는 모델에서는 온도와 엔탈피 값을 구간들로 나타내어 불연속적으로 표현되기 때문에 정수 변수가 사용되어, 프로그램의 계산시간이 매우 오래 걸린다는 단점이 있다. 반면 핀치분석은 열

역학적으로 실현 가능한 에너지 감소량(또는 최소 에너지 소비)을 계 산하고 열 교환 시스템, 에너지 공급 방법 및 공정 운전 조건을 최 적화함으로써 에너지 소비를 최소화할 수 있는 방법론이다[12]. 앞서 언급했듯 실제 산업에서의 공정 스케일은 매우 크기 때문에, 전체 공정에 대한 합성 곡선을 구성하는 것은 어려운 작업이지만, 아스펜 에너지 분석 프로그램을 사용하여 비교적 쉽고 빠르게 열 교환망을 파악할 수 있다. 따라서 석유화학산업에 사용되는 상당한 양의 에너지는 일반적으로 공정 내 스트림의 가열 및 냉각에 사용 되고 있 으므로 석유화학 산업 분야의 냉난방 시스템은 효율적으로 설계되 어야 하기에 핀치분석과 같은 기술을 사용하여 최적의 열 교환 네 트워크를 생성할 수 있다. 이에 열 교환 네트워드는 특히 석유화학 산업과 같은 에너지 집약적 산업에서 프로세스 통합을 위 한 최적화 의 필수 부분으로 열 교환 네트워드의 설치 및 개조를 통 해 외부 에너지 수요를 줄이고 시스템 에너지 효율성을 높이는 것을 목표로[13] 하기 위해 핀치분석을 통한 열 교환 네트워드 합성을 목표로 진행한 여러 연구들이 있다.

석유화학공정 중 올레핀을 생산하는 공정에서의 열 효율성 및 에너지 비용 절감을 위해 핀치분석과 수학적 최적화를 함께 사용하여 올레핀 공정의 열 통합 구현을 위한 연구가 진행되었다. 핀치 분석을 이용하여 올레핀 공정의 열 통합을 위한 열 전달 구간을 확인하고 수학적 모델링을 이용한 최적화를 진행하여 열 효율성을 향상시 켜 에너지 비용을 절감할 수 있다는 이점과 함께 환경 친화적이며 지속 가능한 생산방식으로 이어질 수 있는 결과를 보여준다[14].

[15]은 에틸벤젠 공정에 핀치분석을 적용하여 공정에서의 열 흐름을 분석하고, 열 교환 네트워드의 최적 구성 방안을 모색하고자 한다. 이를 통해 열 교환기의 효율적인 배치 및 열 교환의 최적화를 실현 하여 에너지 효율성을 높이고 운영 비용을 절감할 수 있음을 보여 주며 산업현장에서의 에너지 절감 및 경제성 향상에 큰 기여를 할 수 있다는 이점을 보여주고 있다[15] Joe and Rabi [16]에서는 석 유 정제 공정에서의 열 회수 시스템 개조를 위해 핀치 분석 기술을 사용하여 열 교환 네트워드를 최적화하고 에너지 효율성을 향상시 키는 방법을 제시하고 있다. 결과적으로 열 회수 시스템 개조는 석 유 정제 공정에서 에너지 소비와 운영비용을 효과적으로 감소시킬 수 있었고, 이러한 개조 기술을 활용한다면 산업 환경에서 더욱 효 율적인 에너지 사용과 지속가능한 생산방식을 추구하는 것이 중요 하다는 결과를 보여주고 있다[16]. 이처럼 핀치분석을 통해 공정의 열 흐름을 분석하고 열 교환 네트워드를 사용하게 되면 효율적인 열 통합과 에너지 사용량 감소 및 지속가능한 생산 방식을 추구할 수 있다는 결과를 보여주고 있으나 지속가능한 생산 방식을 추구하 고 자 하는 연구 결과들은 미비하게 나타나고 있다. 일반적으로 화학 공정 설계는 경제적 실행 가능성을 기본으로 하나 지속 가능성에 대한 관심이 높아지면서 석유화학 공정의 설계는 더 이상 기술-경제적 기준에만 집중할 수 없다. 석유화학 공정의 환경적 성능과 관련하여 현재까지 공정시설에 대한 환경 솔루션 접근 방식은 대부분 폐기물 처리, 독성 감소 및 산업 배출량 감소를 목표로 하는 사 후 오염제어 기술의 개념을 중심으로 이루어 졌지만 프로세스에 위 험 요소가 여전히 존재하기 때문에 비용효율성 및 지속 가능한 접근 방식이 아니므로 처음부터 프로세스가 본질적으로 덜 친환경 적 이 다[17].

따라서 본 연구에서는 열 교환 네트워드를 재구성함으로써 기존 NCC공정에 효율적인 에너지 사용 전략을 도출하고, 이에 따른 유

틸리티 사용량 절감을 목표로 한다. 더불어, 환경적 측면을 고려하여 에너지 사용의 환경 영향을 최소화하고, 지속가능한 발전을 추구하 고자 회수기간을 이용한 경제적-환경영향 평가를 진행한다. 또 한 회수기간에 영향을 미치는 주요한 요소들의 영향 정도를 파악하 기 위해 각 사례에 대한 민감도 분석을 수행하여 최적의 열 교환 네 트워크를 설계한다. 2 장에서는 기존 NCC에 대해 설명하고 연구에 적용된 방법론과 고려된 요소들에 대해 설명한다. 3 장에서는 기존 공정의 열 교환 네트워드를 기반으로 네트워드를 재구성하여 에너지 절감을 보여주기 위한 사례 연구가 제시된다. 4 장에서는 결과 가 제시되고 마지막으로 5 장에서는 결론을 제시한다.

## 2. 방법론

### 2-1. 납사 분해 공정(Naphtha Cracking Center, NCC)

납사(Naphtha)는 석유화학공업의 흐름에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있는데, 그 이유는 나프타를 원료로 하여 에틸렌, 프로필렌, 부타디엔, 벤젠, 자일렌 등 석유화학 기초원료를 생산하게 때문이다. NCC는 원유를 정제하여 생성된 납사를 주원료로 고온에서 열분해를 통해 작은 분자량의 유분을 얻는 공정으로 크게 (1) 열분해(Pyrolysis), (2)급냉(Quench), (3)압축(Compression), 그리고 (4)정제(Fractionation) 공정으로 분류할 수 있으며, 에틸렌과 프로필렌을 생산하는 주요 공정이다. 아래 Fig. 1은 납사 분해 공정 흐름을 나타낸 것이다.

#### 2-1-1. 열분해

이 공정에서 납사는 주원료로 하여 고온에서 열분해 후 작은 분자로 분해된다. 열분해에서 나프타는 경질 올레핀 및 방향족 화합물과 같은 더 작은 분자로 분해되며 이는 흡열반응이기 때문에 많은 양의 열 에너지를 필요로 한다. 예열기(Preheater)에서 650 °C로 예열되어 용광로(furnace)로 들어가 800~850 °C의 상태로 분해된다. 고온 열분해하는 분해공정을 거친 생성물들은 급냉공정으로 보내진다[18].

#### 2-1-2. 급냉

급냉공정은 냉각유(Quench Oil)를 사용하는 시스템과 냉각수(Quench water)를 사용하는 시스템으로 구성되어 있으며 열분해 공정으로부터 보내진 가스를 냉각시킨다. 열 분해 공정에서 분해된 가스는 방향족 및 다방향족 화합물을 쉽게 변형시킬 수 있는 탄화수소 가스로 구성되어 있기 때문에 급냉공정에서 분해된 탄화수소끼리 서로 반응하지 못하도록 온도를 낮추게 된다. 이러한 공정 운전시 냉각유로 분해가스 냉각 및 분해 연료 유(Pyrolyzed fuel oil, PFO)가 생성되어 이를 처리하기 위하여 가솔린과 희석증기로 응축시킨다[19].

#### 2-1-3. 압축

압축공정은 분해가스의 경제적인 분리를 위해 분해가스를 압축하여 부피를 감소시키는 공정이다. 압축과정에서 3~4단 사이에 있는 가성 소다 용액 세척탑에서 산성가스를 제거하고 또한 압축과정에서 응축된 1단, 2단, 3단의 탄화수소는 가솔린 정류 탭 및 급냉 탭으로 보내지며, 3단 출구로 나온 분해가스는 프로필렌 냉매에 의해 15 °C까지 냉각된 응축 물 제거 후 건조기로 투입된다. 이후 분리 정제

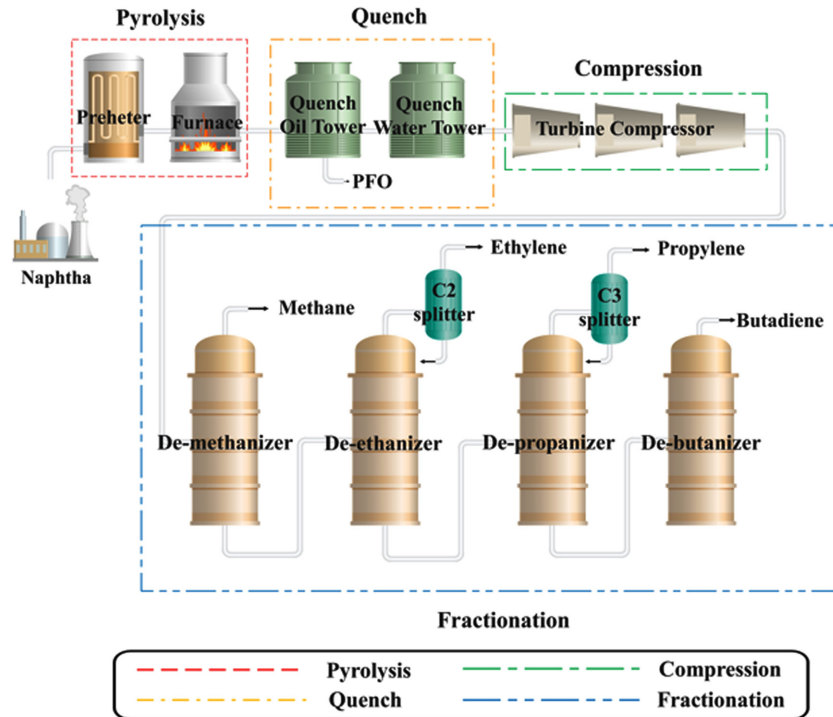


Fig. 1. Simplified diagram of naphtha cracking center.

공정에서 C2, C3, C4, BTX로 각각 분리되어 정제된다[29].

#### 2-1-4. 정제

정제공정에서 압축된 가스는 저온 분류법을 사용하여 수소, 메탄, 에틸렌 프로필렌 및 혼합 C4로 분리된다. 압축된 가스는 탈 메탄탑으로 들어가게 된다. 이때 탈 메탄탑에서는 메탄이 가장 먼저 분리되어 상단에서 빠져나오게 된다. 이후 탈 에탄탑으로 이동한 가스는 상단에서 에틸렌이 분리되어 빠져나오게 되고, 프로판을 제외한 C3+ 구성요소는 하단에서 탈 프로판탑으로 이동하게 된다. 탈 프로판탑에서는 프로판이 분리되어 상단에서 빠져나오게 된다. 이후 C3+ 구성요소는 프로필렌 분리는 C4+를 통과한 후 탈 부탄탑으로 이동하게 된다. 탈 부탄탑에서는 C4+ 및 가솔린을 생산하기 위한 분리가 이루어진다[20].

### 2-2. 에너지절감 기술

#### 2-2-1. 열 교환 네트워크(Heat Exchanger Network, HEN)

열 교환 네트워크의 합성은 산업공정에서 유틸리티 소비를 줄이기 위한 핵심적인 방법으로 공정 내 열적 요구사항의 최적 활용을 통합 외부 에너지(유틸리티) 비용과 같은 운용 비용과 초기 자본 투자 비용 간의 최상의 균형을 찾는 것이 중요한 고전적인 최적화 문제이다[21]. 열 교환 네트워크의 합성은 고온 공정 스트림과 저온 공정 스트림 사이의 열 통합을 의미하며[22], 열 교환기 내에서 열 에너지를 운반하기 위해 사용하여, 열 교환은 냉각이 필요한 고온 스트림과 가열이 필요한 저온 스트림[20], 간의 상호 보완적인 에너지 교환 효과로 폐열을 더 많이 활용함에 따라 유틸리티 사용량을 줄일 수 있다. 열 교환 네트워크 합성은 에너지 소비, 열 전달 면적 및 총 단위 수 사이의 트레이드 오프로 구성된다[23].

본 논문에서는 열 교환 네트워크의 합성과정을 1) 핀치 분석을

이용하여 통합 공정의 흐름을 파악 후 공정 내 발생하는 폐열 분석  
2) 열 교환 네트워크를 이용한 공정 내 에너지 사용량을 분석하여 NCC 공정에서 사용할 각 스트림 별 고온과 저온 스트림을 구성하여 스트림에서 폐열 이용여부를 판단하기 위해 NCC 공정의 핀치 네트워크 구성을 통해 열 교환 네트워크를 진행하였다.

#### 2-2-2. 핀치 분석(Pinch Analysis)

핀치분석은 열교환망에서 열의 흐름을 최적화하여 열 효율을 높이는 데 매우 유용한 기법이다. 핀치분석은 에너지 절약과 환경보호에 큰 역할을 하여 산업분야에서 널리 사용되고 있으며 핀치분석을 적용함으로써 열 효율을 향상시키고, 에너지 및 비용을 절감할 수 있다[24].

핀치 분석에 사용되는 또 다른 중요한 개념 중 하나인 합성곡선(Composite curves)은 실제로 네트워크를 수행하지 않고도 열 통합 문제에 대한 에너지 목표를 추정하는 빠르고 유용한 도구이며 열교환망의 디자인과 운전을 최적화하는 데 중요한 역할을 한다[25]. 아래 Fig. 2에서 형성된 합성 곡선을 확인할 수 있다.

합성 곡선에는 두개의 열역학적 영역이 있다. 이들 중 하나는

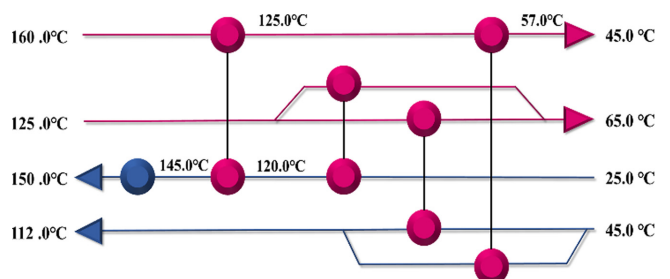


Fig. 2. Common Heat Exchanger Network.

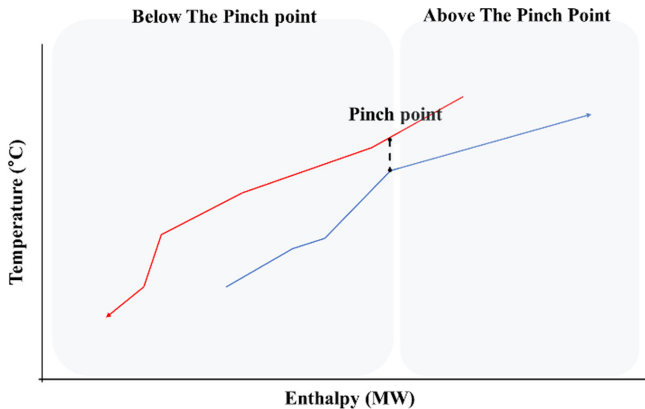


Fig. 3. Composite curves.

“핀치 포인트 보다 위에 있는 영역”으로 에너지 부족이 특징이며 고온 유틸리티만을 필요로 한다. 다른 하나는 “핀치 포인트 아래의 영역”으로 에너지가 과도하게 존재하여 저온 유틸리티만을 필요로 한다. 그러나 핀치 분석을 수행할 때 몇 가지 제한 사항이 있다[8].

- 열교환기는 핀치 포인트를 교차할 수 없다[26].
- 고온 유틸리티의 온도는 핀치 포인트 간격보다 낮아야 한다[10].
- 고온 유틸리티의 구성요소는 증기여야 한다[5,27].

첫번째 제한의 이유는 열교환기가 핀치 포인트를 넘으면 에너지 소비가 최소 요구 사항보다 높아지기 때문이다. 두번째 제한 사항은 고온 흐름과 저온 흐름 사이의 온도 차이가 핀치 포인트 차이보다 크면 열 교환이 발생하지 않는다는 것이다. 대체할 유틸리티가 증기라는 세번째 제한 사항은 공정에서 유틸리티로 사용할 수 있는 다른 스트림보다 쉽게 폐기될 수 있기 때문에 필요하다[5]. 따라서 다음의 제한 사항들을 따라 폐열을 이용하면 유틸리티 소모량을 줄일 수 있다.

### 2-3. 경제적 - 환경 영향 평가

본 논문에서는 NCC 공정에서 유틸리티를 사용하는 대신 공정 내에서 발생하고 있는 폐열을 열 교환기의 구성에 활용하여 에너지 효율성을 높이는 방법 중 하나인 열 교환 네트워크에 대해 이야기하고 있다. 핀치분석을 통한 공정 내 열 흐름을 파악하고, 공정 내 발생하는 폐열 이용여부를 분석하였다. 폐열을 더 많이 활용함에 따라 유틸리티 사용이 절감되지만, 열 교환기 비용도 증가하여, 유틸리티 절감은 이익으로 간주되고, 열 교환기 비용은 손실로 여겨진다. 이에 유틸리티 감소로 인한 수익과 열 교환기 설치로 인한 손실 사이의 균형 및 추세를 고려한 경제성 평가를 수행하였다. 경제성 평가는 회수기간(payback period)을 사용하여 진행하였다. 회수기간은 투자된 자금을 회수하는데 걸린 시간을 알아보기 위함으로, 회수기간이라는 평가 모델을 사용하여 평가할 때, 유틸리티 절감에서 얻는 수익은 열 교환기 비용과 상충관계가 있다. 이에 유틸리티 감소로 인한 수익과 열 교환기 설치로 인한 손실 사이의 균형 및 추세를 고려한 경제성 평가를 수행하였다. 따라서 공정 내 열 교환기를 설치함에 따라 투자 회수 기간의 변동을 평가한다. 또한, 환경적 측면을 고려하여 CO<sub>2</sub>를 배출하는 유틸리티의 사용이 감소할 때 이산화탄소 배출권으로 인한 이익을 얻을 수 있다. 즉, 할당된 이산화탄소 배출권에 대해서 CO<sub>2</sub>가 적게 배출된 만큼 남은 이산화탄소 배출권을 되팔아 이익을 얻을 수 있는 것을 의미한다. 식 (1)에서

회수기간에 대한 식을 보여주고 있다. 모든 회수기간에 대한 투자는 월 단위로 표시된다[28].

$$\text{Payback period} = \frac{P}{ACI} \quad (1)$$

P는 프로젝트 총비용, ACI(Annual cash flow)는 연간 현금 흐름을 의미하며[2](6), 프로젝트 총비용 P는 아래 식을 이용하여 계산한다.

$$P = F_{hx} = A + B \times (\text{Area})^C \quad (2)$$

$F_{hx}$ 는 열교환기 비용,  $\text{Area}^C$ 는 열교환기의 면적, 그리고 A, B, C는 열교환기 비용 파라미터를 의미한다[2]. P와 함께 회수기간을 결정하기 위해 필요한 ACI는 두개의 식으로 계산가능 하며, 환경영향 평가를 포함하지 않았을 때 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$ACI = F_{SC} = F_{ST} \times \dot{m}_{RS} \quad (3)$$

$F_{SC}$ 는 절약된 스팀 비용,  $F_{ST}$ 는 스팀 비용,  $\dot{m}_{RS}$ 는 절약된 스팀 유량이다. ACI에 환경영향이 고려된 경우는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$ACI = F_{SC} + F_{CE} \quad (4)$$

$F_{CE}$ 는 이산화탄소 배출권 판매 비용이다. 그러므로, 식 (4)는 스팀 절감 비용과 이산화탄소 배출권에 대한 이익이 포함되어 있다. 이산화탄소 배출권 판매 비용은 아래의 식으로 계산 가능하다.

$$F_{CE} = \dot{m}_{RS} \times E_{CO_2} \times E_{steam} \times F_{EM} \quad (5)$$

$E_{CO_2}$ 는 이산화탄소 배출계수,  $F_{EM}$ 는 CO<sub>2</sub> 배출 비용,  $E_{steam}$ 는 스팀 비용을 나타낸다[28].

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 사례연구

본 논문에서는 아스펜 에너지 분석을 이용하여 핀치분석에 근거한 기존 NCC 공정에서 사용되는 열 교환망의 효율성을 분석하고, 이를 통해 에너지 사용량을 감축시키는 것을 목표로 하고 있다. 실제 공정에 대한 정보를 바탕으로, 적용가능성이 있는 에너지 저감 방안을 도출하여, 시스템에 미치는 영향을 분석하고 경제성 평가에서 더 나아가 환경영향평가를 수행함으로써 효과적인 방안을 탐색해 보았다. 경제적으로 적정 접근 온도[30]를 도달하기 위해 본 논문에서 사용되는 유틸리티의 유체가 스팀인 점, 원통 다관형 열교환기를 사용하는 점을 고려하여 핀치 온도 차이를 20 °C로 설정하였다. 핀치 온도차를 20 °C로 설정하였을 때 핀치 온도보다 낮은 온도에서 유틸리티가 사용되고 있는 곳의 폐열을 이용하여 열 교환을 하면 경제성이 있을 것이라 예상하였다. 현장 정보에 따르면 Quench oil tower에서 160 °C로 들어가는 열을 155 °C까지 사용할 수 있다는 정보를 바탕으로, 공정 내 발생하는 폐열을 이용하여 기존 MP, LP 스팀을 이용한 C1, C8, C9 스트림에 대해 열 교환을 진행함으로써 사례연구를 진행하였다.

- 사례1: C1 스트림의 요구조건인 저온 스트림을 121 °C까지 올려 주기 위하여 열 교환을 진행하였다.

- 사례2: C8 스트림의 요구조건인 저온 스트림을 83.8 °C까지 올려 주기 위하여 열 교환을 진행하였다.



- 사례 3: C9 스트림의 요구조건인 저온 스트림을 88 °C까지 올려 주기 위하여 열 교환을 진행하였다.

Table 1. Stream information by case

	C1-in (°C)	C-out (°C)	Heat duty (MW)	H-in (°C)	H-out (°C)
C1	105.0	121.0	4.0	160.0	157.2
C2	79.40	83.90	6.0	160.0	155.9
C3	82.70	88.00	3.8	160.0	157.4

위에 대한 사례연구를 바탕으로 경제적·환경 영향 평가를 실시하였다. 본 연구에서는 유틸리티를 사용하는 대신 열 교환기를 사용하여 공정 내 온도를 올려주었기에 추가적인 열 교환기 비용이 경제적·환경 영향 평가를 위해 추가되어야 하고, 그 만큼의 유틸리티 사용량이 줄어들었기 때문에 이를 이익으로 하여 경제성 평가를 실시하였다. 경제성 평가는 투자한 자금에 대한 회수기간을 알아보기 위하여 회수기간을 이용하여 진행하였고 회수기간과 관련한 식은 식 (1)에서 확인할 수 있다. 추가적인 열교환기 설치로 인해 발생한 비용은 식 (2)를 통해 알 수 있으며 각각의 비용 파라미터는  $A=33,422$ ,  $B=814$ ,  $C=0.81$ 이다[2]. 또한 회수기간을 결정하기 위한 연간현금흐름으로 환경영향평가를 고려하지 않았을 때와 고려하였을 때 두 개의 식으로 계산 가능하며 환경영향평가를 고려하지 않고 경제성 평가만을 고려하였을 때의 식 (3)에서 확인 가능하다. 아래 Table 2는 각 스트림의 비용을 나타낸 것이다.

Table 2. Steam cost (Borgogna[3])

Steam	USD/ton
Medium pressure (MP)	28.08
Low pressure (LP)	29.96

반면 환경 영향 평가를 고려했을 때의 식은 식 (4)에서 확인할 수 있다. 환경적 측면을 고려하기 위해서 이산화탄소 배출권에 대한 이익을 추가하였다. 본 논문에서는 유틸리티를 사용하는 대신 열 교환 기를 이용하여 공정 내 온도를 올려주었기 때문에 유틸리티의 사용 량이 줄어든 만큼 이산화탄소 배출량도 줄어들 것으로 판단하여, 줄어든 이산화탄소 배출량만큼 이산화탄소 배출권을 이용하여 되파는 방식으로 진행하였다. 이는 식 (5)에서 확인할 수 있다. 또한 고온 과 저온 스트림에서 시간당 톤으로 스트림이 흐른다는 실제 공정정보를 바탕으로  $\text{CO}_2$ 가 시간당 톤으로 배출됨으로 표현하였다. 다음 아래의 Table 3는 이산화탄소 배출에 대한 양을 시간당 톤으로 나타낸 것이다.

Table 3.  $\text{CO}_2$  emission factor (Wiebe[30])

Energy source	$\text{CO}_2$ (kg $\text{CO}_2$ /ton-h)
Natural gas	0.051523

### 3-2. 핀치 네트워크 및 열 교환 네트워크

열 교환 네트워크를 합성하기에 앞서 스트림에서의 폐열 이용하여부를 판단하기 위해서 NCC 공정의 핀치 네트워크 구성이 수행

Table 4. Case study 1

	C-in (°C)	C-out (°C)	Area ( $\text{m}^2$ )	ton/h	H-in (°C)	H-out (°C)
Base	105.0	121.0	127.8	4.803	298.0	297.0
Case (C1)	105.0	121.0	300.9		160.0	157.0

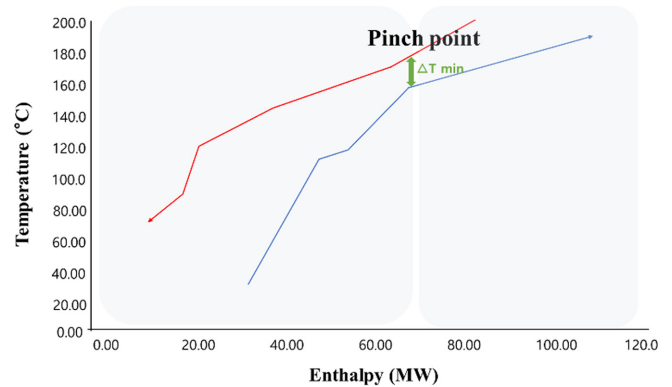


Fig. 4. NCC Process composite curves.

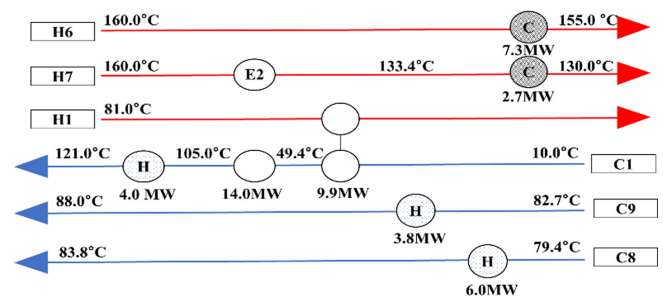


Fig. 5. Base case.

되어야 한다. 핀치 온도 차이를 20 °C로 설정하면 아스펜 에너지 분석에서 합성 곡선을 형성하는데 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

핀치 네트워크를 구성하여 핀치 온도차를 20 °C로 설정하였을 때 핀치 온도가 187~167 °C에서 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 열용량은 가열 12.90 MW, 냉각 41.99 MW가 요구된다. 따라서 핀치 온도보다 낮은 온도에서 유틸리티가 사용되고 있는 곳에 폐열을 이용하여 열 교환을 하면 경제성이 있을 것이라 예상할 수 있다. 아래 Fig. 5는 현재 NCC 공정에서 핀치 네트워크를 아스펜 에너지 분석을 이용하여 구성하였으며 이를 바탕으로 유틸리티 소모량을 줄여 경제성을 평가할 수 있다.

현재 구성한 핀치 네트워크에서 핀치 온도보다 낮은 온도에서 사용하고 있는 C1, C8, C9 3가지 경우에 대하여 사례연구를 진행하였고, Fig. 6에서 확인할 수 있다.

사례 1에서는 열 교환기 C1의 온도를 121 °C로 올려 주기 위하여 MP 스팀을 이용하였다. 그러나 Quench oil tower로 160 °C의 온도로 들어가는 데 이때 155 °C까지 열을 사용할 수 있다는 현장에서의 정보를 바탕으로 MP 스팀을 사용하는 대신 C1 스트림을 열 교환 기를 통하여 열 교환을 진행하였다. C1의 요구조건인 121 °C까지 올려주었으며, 155 °C까지 사용할 수 있는 H6 스트림이 157.3 °C 까지 내려간 것을 확인할 수 있다. 그러므로 H6 스트림의 폐열을 이용하여 MP 스팀 사용량을 줄일 수 있다. 사례 2에서는 C8의 온도를 83.8 °C까지 올려 주기 위하여 기존에 사용하던 LP 스

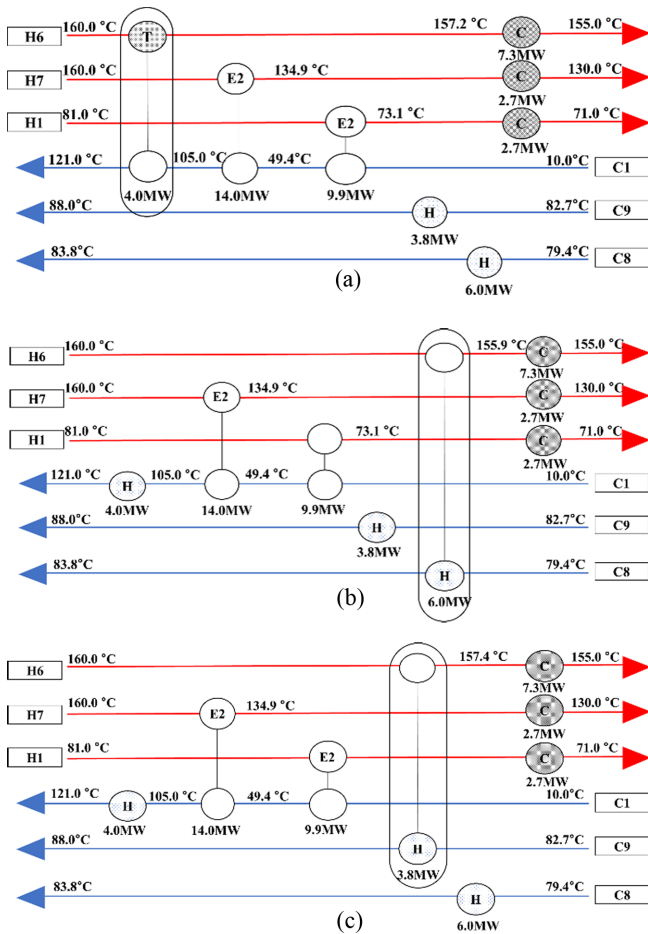


Fig. 6. (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3.

팀대신 H6 스트림에서 발생하는 폐열을 이용하여 C8 스트림을 열 교환기를 통하여 열 교환을 진행하였다. C8의 요구 조건인 83.8 °C까지 올 려주었으며, 155 °C까지 사용할 수 있는 H6 스트림이 155.9°C까지 내 려간 것을 확인할 수 있다. 그러므로 H6 스트림의 폐열을 이용하여 LP 스팀의 사용량을 줄일 수 있다. 사례 3에서는 기존에 사용하던 LP 스팀대신 H6 스트림에서 발생하는 폐열을 이 용하여 C9 스트림을 열 교환기를 통하여 열 교환을 진행하였다. C9 의 요구조건인 83.8 °C까지 올려주었으며 155 °C까지 사용할 수 있는 H6 스트림 이 157.4 °C까지 내려간 것을 확인할 수 있다. 그러므로 H6 스트림의 폐열을 이용하여 LP 스팀 사용량을 줄일 수 있다.

### 3-3. 경제적 환경영향평가

각 사례별 열 교환네트워크 구성한 후 각 사례별 각 사례별 경 제적-환경영향 수행하였다.

Table 5. Case study 2

	C-in (°C)	C-out (°C)	Area (m <sup>2</sup> )	ton/h	H-in (°C)	H-out (°C)
Base	79.4	83.8	302.3	5.977	148.0	147
Case2 (C8)	79.4	83.8	410.4		160.0	155.9

Table 6. Case study 3

	C-in (°C)	C-out (°C)	Area (m <sup>2</sup> )	ton/h	H-in (°C)	H-out (°C)
Base	82.7	88.0	124	5.043	148.0	147.0
Case3 (C9)	82.7	88.0	228.9		160.0	157.4

Table 4에서 MP 스팀 4.803 ton/h가 절약된다는 것을 확인할 수 있으며, 열 교환을 위해서 사용하는 열 교환기의 면적은 300.9 m<sup>2</sup> 이라는 것을 확인할 수 있다.

Table 5에서 LP 스팀 5.99 ton/h가 절약된다는 것을 확인할 수 있 으며, 열 교환을 위해서 사용하는 열 교환기의 면적은 410.4 m<sup>2</sup> 이 라는 것을 확인할 수 있다.

Table 6에서 LP 스팀 5.043 ton/h가 절약된다는 것을 확인할 수 있으며, 열 교환을 위해서 사용하는 열 교환기의 면적은 228.9 m<sup>2</sup> 이라는 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 회수기간을 이용하여 경제성 평가와 경제적-환경영향 평가를 한 결과를 Fig. 7에서 확인 할 수 있다.

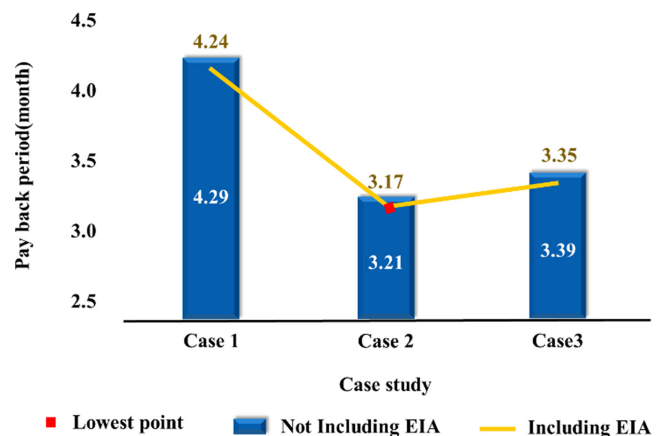


Fig. 7. Payback period for each case.

경제성 평가를 하였을 때 각 사례별 회수기간은 각각 4.26개월, 3.21개월, 3.39개월로 가장 빠른 투자 회수기간은 사례 2로 가장 경 제적인 것으로 나타났다. 화석연료 등 연소시켜 증기를 생산하는 것을 환경에 유해함으로 이산화탄소 배출권에 의해 발생된 이익은 스팀 소비량을 줄임으로써 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소되기 때문에 이에 대 한 이익이 발생한다. 따라서 식 4를 이용하여 환경적 측면까지 고 려하게 된다면 가장 낮은 투자 회수기간은 바뀔 수도 있다. 환경적 측면까지 고려하여 투자 회수기간을 살펴본 결과 각 사례별로 4.24 개월, 3.17 개월, 3.35개월로 가장 낮은 투자 회수기간을 사례 2 로 나타났다. 이러한 변동은 환경영향을 포함하지 않았을 때와 포함하 였을 때 모두 동등하게 나타났다.

### 3-4. 민감도 분석

지금까지 각 사례별로 열 교환 네트워크를 구성하여 폐열을 이용 하여 열 교환을 진행하였고, 이에 대한 경제적-환경 영향평가를 수 행하였다. 이를 바탕으로 경제적-환경영향 평가를 진행하였을 때

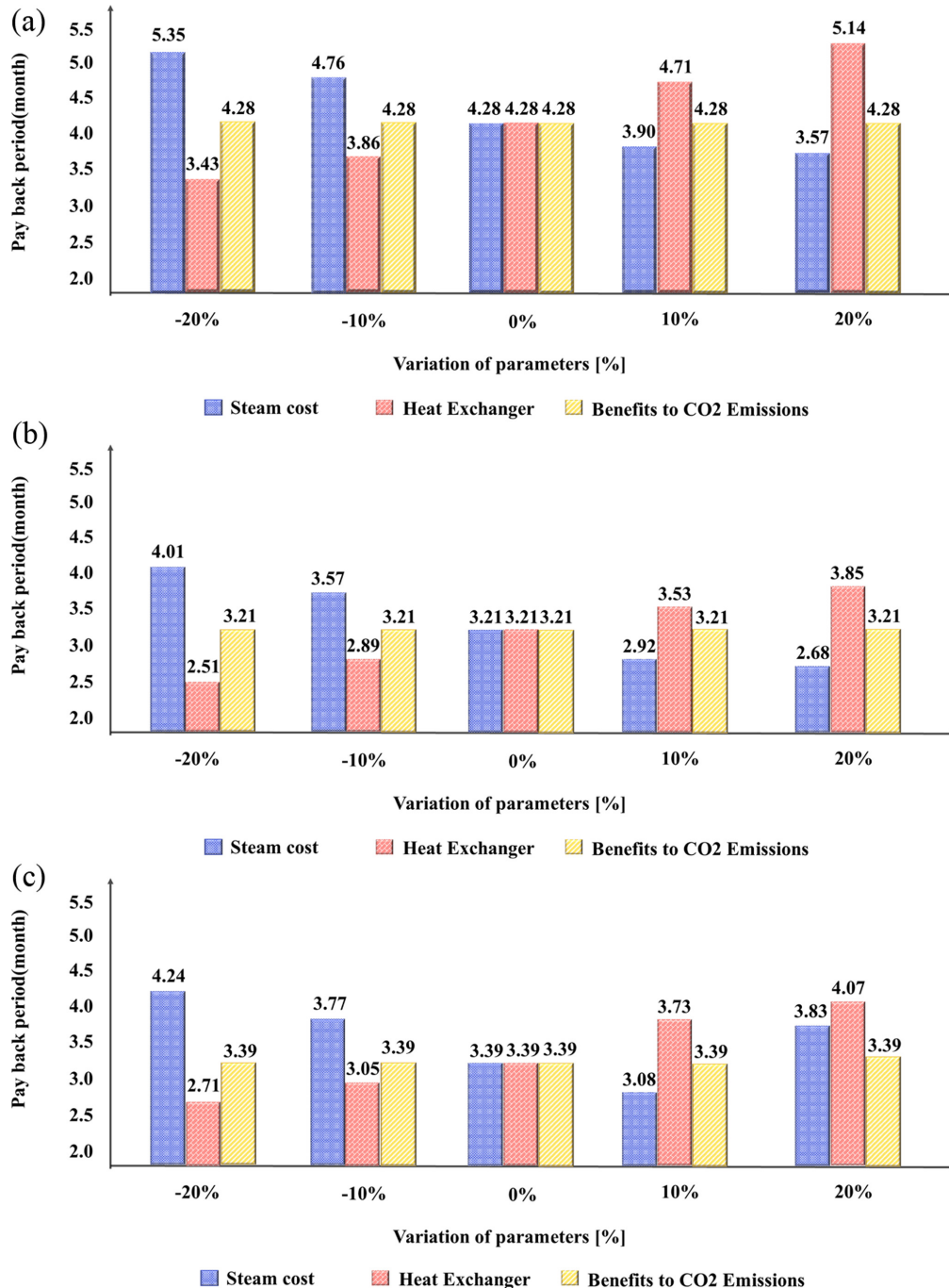


Fig. 8. (a) Case1, Case 2, Case 3 sensitivity analysis.

포함되는 주요한 요소들이 회수기간에 영향을 미치는 정도를 확인하기 위하여 각 사례별 민감도 분석을 진행하였다. 회수기간에 영향을 미치는 주요한 요소들로는 열 교환기, 유틸리티 사용량이 감소됨으로써 발생하는 이익, 이산화탄소 배출권의 이익을 고려하였다. 아래 Fig. 8에 민감도 분석 결과를 보여주고 있다.

다른 요소들은 일정하게 유지하면서 20% 증가 및 감소를 고려하여 경제적-환경영향평가에 미치는 영향 분석결과 열교환기 비용이 전체적인 비용에 영향을 미치는 주요 원인으로 확인되었다. 이는 모든 사례에서 열교환기 비용을 20%로 줄였을 때 가장 좋은 회수기간을 나타내는 것을 확인함으로써 알 수 있다. 반면에 모든 사

례에서 이산화탄소 배출권에 대한 비용은 전체적인 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

본연구에서는 열 교환 네트워크를 재구성함으로써 기존 NCC 공정에 효율적인 에너지 사용 전략을 도출하고, 이에 따른 유틸리티 사용량 절감을 목표로 하였다. 더 나아가 환경적 측면까지 고려하여 에너지 사용의 환경 영향을 최소화하고, 지속가능한 발전을 추구하고자 회수기간을 이용한 경제적-환경영향 평가를 수행하였다. 또한 회수기간에 영향을 미치는 주요한 요소들의 영향 정도를 파악하기 위해서 민감도 분석을 수행한 결과 열 교환기 비용이 경제적-환경 영향평가에서 주요 요소로 확인되었다.



#### 4. 결 론

본 연구는 펀치 분석에 근거하여 기존 NCC 공정에서 사용되는 열 교환망의 효율성을 분석하고 에너지를 절감할 수 있는 방안을 찾는 것을 목표로 하였다. 유틸리티를 사용하는 대신 열 교환기를 사용 하여 공정 내 온도를 올려주었기에 추가적인 열 교환기 비용이 경제적-환경영향평가를 위해 추가되어야 하고, 그 만큼의 유틸리티 사용량이 줄어들었기 때문에 이를 이익으로 하여 경제성평가를 실시하였다. 또한 환경적 측면을 고려하기 위해서 줄어든 유틸리티 사용량만큼 이산화탄소 배출량도 줄어든 것으로 판단하여, 줄어든 이산화탄소 배출량만큼 이산화탄소 배출권을 이용하여 되파는 방식으로 진행하였다. 또한 주요한 요소들이 회수기간에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위하여 민감도 분석을 진행하였다.

유틸리티 사용량의 감소는 경제성 평가와 관련이 있다. 기존 NCC 공정에서 스팀을 이용하여 공정의 온도를 올려주었다면 본 논문에서는 폐열을 이용하여 열 교환을 진행한 결과 각 사례별로 4.803 ton/h, 5.997 ton/h, 5.403 ton/h의 스팀 사용량이 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

경제적-환경 영향 평가를 실시하기 위하여 열교환기 비용과 유틸리티 사용량이 감소됨으로써 발생하는 이익, 이산화탄소 배출권에 대한 비용을 고려하여 경제적-환경영향 평가를 회수기간으로 진행하였다. 결과는 환경영향평가를 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때 두가지로 나타났다. 환경영향평가를 고려하지 않았을 때는 각 사례별로 4.29개월, 3.21개월, 3.39개월로 나타났고, 환경영향평가를 고려하였을 때는 각 사례별로 4.24개월, 3.17개월, 3.35개월로 회수 기간을 보였다. 이러한 결과는 환경영향을 포함하지 않았을 때와 포함하였을 때 모두 동등하게 사례 2가 가장 좋은 결과를 보였다.

주요한 요소가 회수기간에 어느정도 영향을 주는지 확인하기 위해 각 사례별 민감도 분석을 수행하였다. 회수기간에 영향을 미치는 요소로는 열교환기, 유틸리티 사용량이 감소됨으로써 발생하는 이익, 이산화탄소 배출권에 대한 이익으로 진행하였다. 다른 요소들은 일정하게 유지하면서 20% 증가 및 감소를 고려하여 경제적-환경영향평가에 미치는 영향을 분석한 결과 열 교환기 비용이 전체 적인 비용에 영향을 미치는 주요 원인으로 확인되었다. 따라서 열 교환기 비용이 회수기간에 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

#### 감 사

이 성과는 정보(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1G1A1093355).

#### References

1. Kanagaraj, S., Varanda, F. R., Zhil'tsova, T. V., Oliveira, M. S., and Simões, J. A., "Mechanical Properties of High Density Polyethylene/carbon Nanotube Composites," *Composites Science and Technology* **67**, 3071(2007).
2. Luyt, A., Molefi, J. and Krump, H., "Thermal, Mechanical and Electrical Properties of Copper Powder Filled Low-density and Linear Low-density Polyethylene Composites," *Polymer Degradation and Stability* **91**, 1629(2006).
3. Hotta, S. and Paul, D., "Nanocomposites Formed From Linear Low Density Polyethylene and Organoclays," *Polymer* **45**, 7639(2004).
4. Kim, S. and Oh, S., "Impact of us Shale Gas on the Vertical and Horizontal Dynamics of Ethylene Price," *Energies* **13**, 4479(2020).
5. Jung, S., Jung, H. and Ahn, Y., "Optimal Economic-environmental Design of Heat Exchanger Network in Naphtha Cracking Center Considering Fuel Type and co2 Emissions," *Energies* **15**, 9538(2022).
6. Matar, S. and Hatch, L. F., *Chemistry of Petrochemical Processes*, Elsevier(2001).
7. Geng, Z., Qin, L., Han, Y. and Zhu, Q., "Energy Saving and Prediction Modeling of Petrochemical Industries: A Novel Elm Based on Fahp," *Energy* **122**, 350(2017).
8. Pedram, S., Kaghazchi, T. and Ravanchi, M. T., "Performance and Energy Consumption of Membrane-distillation Hybrid Systems for Olefin-paraffin Separation," *Chemical Engineering & Technology* **37**, 587(2014).
9. Kumar, R., Golden, T., White, T. and Rokicki, A., "Novel Adsorption Distillation Hybrid Scheme for Propane/propylene Separation," *Separation Science and Technology* **27**, 2157(1992).
10. Motelica, A., Bruinsma, O. S., Kreiter, R., den Exter, M. and Vente, J. F., "Membrane Retrofit Option for Paraffin/olefin Separation? a Technoeconomic Evaluation," *Industrial & Engineering Chemistry Research* **51**, 6977(2012).
11. Khoshbin, R., Oruji, S. and Karimzadeh, R., "Catalytic Cracking of Light Naphtha over Hierarchical Zsm-5 Using Rice Husk Ash as Silica Source in Presence of Ultrasound Energy: Effect of Carbon Nanotube Content," *Advanced Powder Technology* **29**, 2176(2018).
12. Li, B.-H., Castillo, Y. E. C. and Chang, C.-T., "An Improved Design Method for Retrofitting Industrial Heat Exchanger Networks Based on Pinch Analysis," *Chemical Engineering Research and Design* **148**, 260(2019).
13. Li, N., Wang, J., Kleme, J. J., Wang, Q., Varbanov, P. S., Yang, W., Liu, X. and Zeng, M., "A Target-evaluation Method for Heat Exchanger Network Optimisation with Heat Transfer Enhancement," *Energy Conversion and Management* **238**, 114154(2021).
14. Borgogna, A., Iaquaniello, G., Salladini, A., Agostini, E. and Boccacci, M., "Chemical Carbon and Hydrogen Recycle Through Waste Gasification: The Methanol Route," *Gasification*, 85(2021).
15. Yoon, S.-G., Lee, J. and Park, S., "Heat Integration Analysis for an Industrial Ethylbenzene Plant Using Pinch Analysis," *Applied Thermal Engineering* **27**, 886(2007).
16. Joe, J. M. and Rabiou, A. M., "Retrofit of the Heat Recovery System of a Petroleum Refinery Using Pinch Analysis," (2013).
17. Abbaszadeh, S. and Hassim, M. H., "Comparison of Methods Assessing Environmental Friendliness of Petrochemical Process Design," *Journal of Cleaner Production* **71**, 110(2014).
18. Fakhroleslam, M. and Sadrameli, S. M., "Thermal/catalytic Cracking of Hydrocarbons for the Production of Olefins; a State-of-the-art Review iii: Process Modeling and Simulation," *Fuel* **252**, 553(2019).
19. Lee, J. and Park, S.-K., "Synthesis of Carbon Materials From Pfo, Byproducts of Naphtha Cracking Process," *Applied Chemistry for Engineering* **22**, 495(2011).
20. Ren, T., Patel, M. and Blok, K., "Olefins from Conventional and

- Heavy Feedstocks: Energy Use in Steam Cracking and Alternative Processes,” *Energy* **31**, 425(2006).
21. Li, N., Wang, J., Kleme, J. J., Wang, Q., Varbanov, P. S., Yang, W., Liu, X. and Zeng, M., “A Target-evaluation Method for Heat Exchanger Network Optimisation with Heat Transfer Enhancement,” *Energy Conversion and Management* **238**, 114154(2021).
  22. Al-Riyami, B. A., Kleme, J. and Perry, S., “Heat Integration Retrofit Analysis of a Heat Exchanger Network of a Fluid Catalytic Cracking Plant,” *Applied Thermal Engineering* **21**, 1449(2001).
  23. Kemp, I. C., *Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, Elsevier(2011).
  24. Kemp, I. C., *Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, Elsevier(2011).
  25. Liu, J., Zhang, P., Xie, Q., Liang, D. and Bai, L., “Flexibility Analysis and Design of Heat Exchanger Network for Syngas-to-methanol Process,” *International Journal of Coal Science & Technology*, 1(2021).
  26. Yamaki, T., Sakai, M., Matsukata, M., Tsutsuminai, S., Sakamoto, N., Toratani, N. and Kataoka, S., “Impact of Process Configuration on Energy Consumption and Membrane Area in Hybrid Separation Process Using Olefin-selective Zeolite Membrane,” *Separation and Purification Technology* **294**, 121208(2022).
  27. March, L., “Introduction to Pinch Technology,” *Targeting House, Gadbroke Park, Northwich, Cheshire, CW9 7UZ, England*(1998).
  28. Islam, F., *Sustainability Assessment of Direct Energy Deposition (ded) Based Hybrid Manufacturing Using Life Cycle Assessment (lca) Method*, West Virginia University(2021).
  29. Ganjehkaviri, A., Jaafar, M. M. and Hosseini, S. E., “Optimization and the Effect of Steam Turbine Outlet Quality on the Output Power of a Combined Cycle Power Plant,” *Energy Conversion and Management* **89**, 231(2015).
  30. Gao, Y. Q., “An Integrate-over-temperature Approach for Enhanced Sampling,” *Journal of Chemical Physics* **128**, 064105(2008).
  31. Beninca, M., Trierweiler, J. O. and Secchi, A. R., “Heat Integration of an Olefins Plant: Pinch Analysis and Mathematical Optimization Working Together,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering* **28**, 101(2011).
  32. Wiebe, K. S., Bruckner, M., Giljum, S. and Lutz, C., “Calculating Energy-related co2 Emissions Embodied in International Trade Using a Global Input-output Model,” *Economic Systems Research* **24**, 113(2012).

#### Authors

**Hyojin Jung:** Hyojin Jung, undergraduate student, Department of Chemical Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, South Korea; 03jini@kmu.kr

**Subin Jung:** Subin Jung, master student, Department of Chemical Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, South Korea; 5589700@kmu.kr

**Yuchan Ahn:** Yuchan Ahn, Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, South Korea; yuchan.ahn@kmu.ac.kr