

유틸리티 네트워크와 수소 공급망 통합 네트워크 설계를 위한 결정론적 최적화 모델 개발

황보순호* · 한지훈** · 이인범*,***,†

*포항공과대학교 화학공학과
790-784 경북 포항시 남구 효자동 산31
**위스콘신매디슨대학교 화학생물공학과
53706 위스콘신주 매디슨시
***포항공과대학교 엔지니어링대학원
790-784 경북 포항시 남구 효자동 산31

(2014년 3월 28일 접수, 2014년 5월 29일 수정본 접수, 2014년 6월 5일 채택)

Development of a Deterministic Optimization Model for Design of an Integrated Utility and Hydrogen Supply Network

Soonho Hwangbo*, Jeehoon Han** and In-Beum Lee*,***,†

*Department of Chemical Engineering, POSTECH, San 31 Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk 790-784, Korea

**Department of Chemical and Biological Engineering, University of Wisconsin-Madison Madison, WI 53706, USA

***Graduate School of Engineering Mastership, POSTECH, San 31 Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk 790-784, Korea

(Received 28 March 2014; Received in revised form 29 May 2014; accepted 5 June 2014)

요 약

대규모 산업 단지 내에는 다양한 네트워크가 형성되어 있다. 각각의 네트워크들은 네트워크를 구성하는 요소들이 필요로 하는 물질의 생산 및 수송을 통하여 물질의 수요를 충족시킨다. 네트워크 자체적으로 직접 생산을 통하여 각 공장들이 필요로 하는 물질의 수요를 충족시키기도 하며 수요량의 변화나 경제적 요소들로 인하여 네트워크 외부에서 필요로 하는 물질을 구매하여 네트워크 내에서 수송하기도 한다. 특히나 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크는 대규모 산업 단지의 대표적인 네트워크들이며 이러한 네트워크들의 비용적 절감 및 네트워크 구성의 최적화와 관련된 많은 연구들이 수행되어 왔다. 하지만 두 네트워크를 연결하여 통합된 네트워크 모델을 구축하여 최적화를 진행한 연구는 진행되어 있지 않았다. 본 논문에서는 유틸리티 네트워크에서 발생하는 여분의 스팀을 수증기 메탄 개질 공정의 원료로 사용하여 수소를 생산한 후, 생산된 수소를 수소 네트워크에 주입하여 수소 네트워크의 수소 수요량을 충족시키는 모델을 개발하였다. 제시된 모델은 유틸리티 네트워크의 유틸리티 수요량과 수소 네트워크의 수소 수요량을 모두 충족시키면서 통합된 네트워크 모델의 최적 설계 및 네트워크 구성도를 결정할 수 있게 하고, 요구되는 전체 비용을 계산 가능하게 한다. 본 연구에서 제시한 모델의 타당성을 평가하기 위하여 국내 최대 규모의 대규모 석유 화학 산업 단지를 가지고 있는 여수 석유 화학 단지를 대상으로 사례를 적용해 보았으며 이 사례 연구를 통하여 얻은 결과는 기존의 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크를 개별적으로 연구한 결과와 비교하여 더 최적의 결정을 제시할 것이다.

Abstract – Lots of networks are constructed in a large scale industrial complex. Each network meet their demands through production or transportation of materials which are needed to companies in a network. Network directly produces materials for satisfying demands in a company or purchase form outside due to demand uncertainty, financial factor, and so on. Especially utility network and hydrogen network are typical and major networks in a large scale industrial complex. Many studies have been done mainly with focusing on minimizing the total cost or optimizing the network structure. But, few research tries to make an integrated network model by connecting utility network and hydrogen network. In this study, deterministic mixed integer linear programming model is developed for integrating utility network and hydrogen network. Steam Methane Reforming process is necessary for combining two networks. After producing

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: iblee@postech.ac.kr

‡이 논문은 서울대학교 윤인섭 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

hydrogen from Steam-Methane Reforming process whose raw material is steam vents from utility network, produced hydrogen go into hydrogen network and fulfill own needs. Proposed model can suggest optimized case in integrated network model, optimized blueprint, and calculate optimal total cost. The capability of the proposed model is tested by applying it to Yeosu industrial complex in Korea. Yeosu industrial complex has the one of the biggest petrochemical complex and various papers are based in data of Yeosu industrial complex. From a case study, the integrated network model suggests more optimal conclusions compared with previous results obtained by individually researching utility network and hydrogen network

Key words : Hydrogen Network, Utility Network, Deterministic Mixed Integer Linear Programming, Steam-Methane Reforming Process

1. 서 론

산업의 공급망(supply chain management)은 원재료를 획득하고, 이 원재료를 중간제품이나 최종제품으로 변환하여 공급망 네트워크를 구성하는 제품들의 수요를 충족시키면서 네트워크의 구성 및 운영과 관련된 전반적인 비용을 최소화하는 것이다[1]. 현재, 대부분 산업분야에서 제품 생산 비용의 상당 부분은 공정상에 필요한 유틸리티(스팀과 전기) 비용이다[2]. 산업단지 내 각 기업에서 유틸리티 비용을 줄이기 위해 제품 공정에서 남는 유틸리티를 기업간 저렴하게 사용할 수 있도록 유틸리티 네트워크 최적 설계에 관한 연구가 활발히 진행 중이다[3-5]. 또한, 수소는 다양한 산업분야에서 원재료 또는 유틸리티를 생산하기 위한 에너지원으로서 수요가 꾸준히 증가하고 있으며[6] 이에 따른 수소의 효율적인 저장, 수소 수요의 불확실성, 혹은 수소 네트워크 내의 위험 요소를 고려한 최적화 모델 구축에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[7-11]. 더불어 산업단지 내 발생하는 부산물로서 수소를 재활용하기 위한 네트워크 최적 설계에 관한 연구도 꾸준히 진행되어 오고 있다[12]. 유틸리티 네트워크의 경우 네트워크의 구축 및 운영비용의 최소화에 대한 연구[3]가 일반적이며 유틸리티 수요의 불확실성 혹은 네트워크 내에 잠재된 위험요소들에 대한 연구가 진행 중이다[13].

하지만 지금까지 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크에 대한 연구는 각각의 네트워크에 대하여 개별적으로 진행되어 왔다. 대규모 석유 화학 산업 단지에서의 유틸리티 네트워크는 스팀 수송과 밀접한 관계가 있다. 따라서 대규모 석유 화학 산업 단지를 대상으로 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크 사이의 연결 고리를 찾아 통합된 네트워크 모델을 구축한다면 더욱 최적화된 네트워크가 설계 가능하다. 다음 3가지 상황을 통하여 두 네트워크 간의 관계를 연결 지어볼 수 있다.

- 1) 대규모의 석유 화학 산업 단지의 경우 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크가 공존하는 경우가 많다.
- 2) 유틸리티 네트워크 같은 경우 유틸리티의 수요를 충족시키고 남은 잉여 스팀이 존재하며 현재 이 잉여 스팀은 대부분은 대기로 배출하고 있다[3].
- 3) 수소를 생산하는 여러 공정들(Fig. 1) 중 스팀과 탄화수소를 통하여 수소를 생산하는 개질 수증기-메탄 개질 공정(Steam Methane Reforming: SMR)이 있다[14].

유틸리티 네트워크와 수소 네트워크가 특정 지역 내에 공존하지 않더라도 유틸리티 네트워크에서 발생하는 잉여 스팀을 수소로 전환한다면 저장 및 수송 기술을 도입하여 수소 네트워크의 공급처로서 유틸리티 네트워크가 정의될 수 있다.

본 연구에서는 대규모 석유 화학 산업 단지 내의 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크를 통합한 네트워크 모델을 설계하기 위한 최적

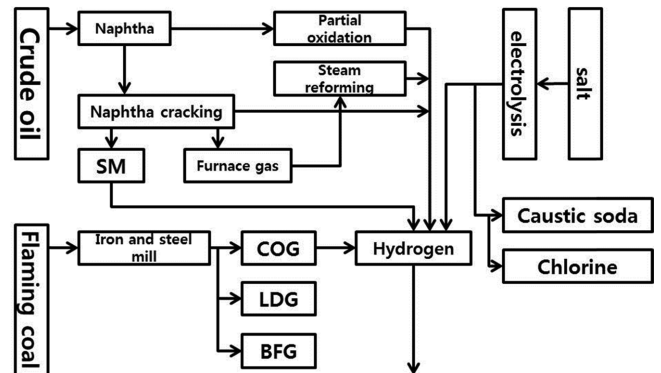


Fig. 1. Hydrogen production diagram.

화 방법을 제시하고자 한다. 적당한 위치에 SMR 공정을 설치한다는 가정하에 유틸리티 네트워크-SMR 공정-수소 네트워크가 통합된 결정론적 모델(Deterministic Model)을 구축하여 전체 비용의 최소화를 하는 것이 본 연구의 주된 요소이다. 개발된 모델은 전체 비용을 최소화하면서 유틸리티와 수소의 수요를 충족시키기 위하여 네트워크 내의 구성요소들이 어떻게 연결되어야 하는지와 각 네트워크 내의 수송되는 물질의 양 등을 결정한다.

2. 이론적 배경

현재 소수의 공장들이 수소를 직접 생산하여 수요를 충족시키거나 주변 공장으로부터 판매하고 있는 반면 대부분의 공장들은 외부로부터 수소를 구매하여 수요를 충족시키고 있다[14]. 수소 네트워크를 형성하는 산업 단지 내에서 수소의 수요를 내부적으로 처리할 수 있다면 네트워크의 안전성뿐만 아니라 비용의 측면에서도 효율적이다. 다양한 수소 생산 공정 중 산업 단지 내에서 수소를 생산하는 과정에 주로 쓰이는 공정은 SMR 공정이다[15].

하지만 수소 네트워크 내에 SMR 공정을 설치하여 내부적으로 수소의 수요를 충족시키기 위해서는 SMR 공정에 주입되는 다량의 스팀이 존재해야만 한다. 따라서 다량의 잉여 스팀을 발생시키는 유틸리티 네트워크를 수소 네트워크에 통합을 시켜 최적화 모델을 구축한다면 수소와 유틸리티의 수요를 모두 충족시키면서 전체 비용의 절감을 기대할 수 있다.

2-1. 문제 기술

유틸리티 네트워크와 수소 네트워크의 통합 모델의 최적화 목표는 수소 네트워크 내부의 수소 수요를 충족시키기 위하여 유틸리티 네트워크에서 발생하는 잉여의 스팀을 SMR 공정을 거쳐 수소를 생산

하는 과정에서 각각의 네트워크 내부의 물질 흐름의 활동을 결정하고 전체 통합 모델의 설치 및 운영 비용을 최소화하는 것이다. 산업단지 내의 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크의 통합 모델을 구축하기 위하여 다음과 같이 문제를 정의 하였다.

1) 유틸리티 네트워크가 구성된 지역과 수소 네트워크가 구성된 지역간의 거리는 너무 멀지 않아야 한다. 또한, 네트워크 거리는 다수로 다양하게 분포되어 있는 공급원들과 수요처 간의 거리를 유클리디언 거리로 표현하는 것이 더 합리적인 방법이기때문에 네트워크 거리는 유클리디언 거리를 가정한다[16-18].

2) 유틸리티 네트워크에서 발생하는 잉여 스팀은 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크 사이에 적절히 위치한 SMR 공정으로 연료와 함께 주입된다.

3) SMR 공정을 거쳐 발생하는 수소는 수소 네트워크로 주입된다. 통합 모델 구축을 위하여 가정된 부분은 다음과 같다.

1) 모든 네트워크는 파이프프로 구성된다.

2) SMR 공정의 설치 및 운영 비용을 산출 하기 위하여 Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)와 six-tenth rule [19,20]을 적용한다.

3) 인건비는 통합 모델의 전체 비용에서 제외한다.

4) 수소 네트워크는 SMR 공정에서 발생하는 고순도의 수소를 그대로 사용한다.

본 연구에서 제시하는 수학적 모델은 결정론적 혼합정수 선형계획법(Deterministic Mixed Integer Linear Programming)이며 이 모델의 의사 결정(Decision making) 구조는 다음과 같다.

• 주어진 조건(상수)

- 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크 내의 각 공장들에 대한 유틸리티와 수소의 개별 수요량
- 네트워크 내의 물질 이동 허용량
- 유틸리티 네트워크 내의 공장들 사이의 거리
- 수소 네트워크 내의 공장들 사이의 거리
- 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크 내의 각 공장들로부터 SMR 공정까지 거리

• 결정인자(변수)

- 통합 네트워크 내의 유틸리티, 수소 생산시설들의 위치, 수 및 각 해당 시설들의 물질 흐름 양
- 통합 네트워크 내의 파이프 설치 변수(2진법)

2-2. 최적화 문제의 구성

2-2-1. 목적함수

제안된 모델의 목적함수는 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크를 통합한 네트워크 모델의 설치 및 운영 비용을 최소화하는 것이다. 이 목적함수는 유틸리티 네트워크 운영 비용, 수소 네트워크 운영 비용, 각 네트워크에서 SMR 공정까지 연결되는 파이프 설치 및 운영 비용, SMR 공정 설치 및 운영비용으로 구성된다. 그러나 이러한 항목들로 구성된 목적함수를 최소화하면 최적해가 도출되지 않는다. SMR 공정을 거쳐 나오는 수소의 수송과 관련된 식들이 비선형 식들이기 때문이다. 이러한 비선형 식들을 처리하여 MILP(Mixed Integer Linear Programming) 모델로 구현하기 위하여 새로운 방법으로 목적함수와 관련된 부분을 해결하였다.

2-2-2. 목적함수의 새로운 접근

통합 모델의 최적화에 가장 핵심이 되는 부분은 전체 네트워크를 구성하는 파이프의 설치 및 운영 비용이다. 유틸리티 네트워크 내에서 수송되는 스팀에 대한 파이프 설치 및 운영 비용에 관한 식들은 간단한 선형 식들이지만 수소 네트워크 내에서 수송되는 수소에 대한 파이프 설치 및 운영 비용은 복잡한 비선형 식들이다. 하지만 파이프의 설치 및 운영 비용은 기본적으로 파이프의 길이에 비례한다. 따라서 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크를 구성하는 공장들로부터 SMR 공정이 설치될 장소까지 거리를 계산한다. 계산된 값들을 상수로 처리하여 일차적으로 통합된 모델에서 유틸리티 수요와 수소 수요를 충족시키면서 각 네트워크 내의 파이프들과 각 네트워크와 SMR 공정까지의 파이프를 구성에 대한 함수에 대하여 최적화한다.

$$C_{t,i}^{Raw} = \sum_d \sum_m \text{pri}_m \cdot X_{t,i,d,m,"CON"} + \sum_h \sum_n \text{pri}_n \cdot X_{t,i,d,n,"IN"} + \text{pri}^{Electricity} \cdot y_{t,i,"IN"} + \sum_d \sum_q \text{pri}_q \cdot X_{t,i,d,q,"GEN"} + \sum_d \sum_r \text{pri}_r \cdot X_{t,i,d,r,"GEN"} \quad (1)$$

$$C_{t,i,i,f}^{Invest} = \frac{(a_{t,i,i,f}^{Invest} \cdot br_{t,i,i,f} + b_{t,i,i,f}^{Invest} \cdot r_{t,i,i,f}) \cdot \text{Dist}_{i,i} + (a_{t,i,ss,xy,f}^{Invest} \cdot h_X3_{t,i,ss,xy,f} + b_{t,i,ss,xy,f}^{Invest} \cdot h_Q3_{t,i,ss,xy,f}) \cdot pL3_{i,ss,xy}}{DP} \quad (2)$$

$$C_{t,i,i,f}^{Oper} = (\alpha_{t,i,i,f}^{Oper} \cdot br_{t,i,i,f} + \beta_{t,i,i,f}^{Oper} \cdot r_{t,i,i,f}) \cdot \text{Dist}_{i,i} + (\alpha_{t,i,ss,xy,f}^{Oper} \cdot h_X3_{t,i,ss,xy,f} + \beta_{t,i,ss,xy,f}^{Oper} \cdot h_Q3_{t,i,ss,xy,f}) \cdot pL3_{i,ss,xy} \quad (3)$$

$$\text{pipelinecost1}_{t,h,j,j'} = Pcost \cdot pL_{h,j,j'} \cdot h_X_{t,h,j,j'} \quad (4)$$

$$\text{pipelinecost2}_{t,ss,xy,h,j} = Pcost \cdot pL2_{ss,xy} \cdot h_X2_{t,ss,xy,h,j} \quad (5)$$

$$\text{Minimize Cost1} = \sum C_{t,i,i}^{Raw} + \sum C_{t,i,i,f}^{Invest} + \sum C_{t,i,i,f}^{Oper} + \sum \text{pipelinecost1}_{t,h,j,j'} + \sum \text{pipelinecost2}_{t,ss,xy,h,j} \quad (6)$$

식 (1)~(3)은 유틸리티 네트워크에 해당되는 식이다. 식 (1)은 보일러에서 생산되는 스팀, 네트워크에 주입되는 물과 전기, 발생하는 SO_x와 greenhouse gas에 대한 비용이다. 식 (2)와 (3)은 유틸리티 네트워크를 구성하는 파이프 라인의 설치 및 운영 비용이다. 유틸리티 네트워크뿐만 아니라 유틸리티 네트워크에서 SMR 공정으로 연결되는 파이프 라인에 대한 항도 첨가되어 있으며 설치 비용의 경우 감가상가를 고려하였다. 식 (4)와 (5)는 SMR 공정에서 수소 네트워크로의 파이프 연결과 수소 네트워크 내부에서의 파이프 연결에 관련된 식이며 앞서 언급한 듯이 통합된 네트워크 모델의 파이프 라인 구축을 위한 명목상의 항이다. 이를 통하여 얻은 결과값들 중에서 수소 수송과 관련된 수소 유량과 수소를 수송하는 파이프들의 길이에 대한 결과값들을 상수로 처리하였다. 이 상수들을 수소를 수송하는 파이프들의 설치 및 운영비용에 대한 비선형식에 대입하여 수소 수송과 관련된 실제 파이프 설치 및 운영비용을 산출해 낸다. 즉, 통합 모델에서 수소와 관련된 네트워크의 파이프들의 구성을 위하여 도입된 명목상의 항들은(pipelinecost1_{t,h,j,j'}, pipelinecost2_{t,ss,xy,h,j}) 다시 제거하고 최적화 이후에 결과값들(수소 유량, 파이프 길이)로 계산된

수소 수송을 위한 파이프들의 설치 및 운영비용($Cost^{pipe1}$, $Cost^{pipe2}$)과 SMR 공정에 대한 설치 및 운영비용($SMRcost$)을 더함으로써 최종 목적함수가 구축된다. 기존의 일반적인 최적화 기법에 쓰이는 목적함수와는 다르게 본 연구에 제시된 최종 목적함수를 구성하는 항들은 앞서 설명한 것처럼 모두 계산된 상수 항이다. SMR 공정에 대한 설치 및 운영비용은 CEPCI 식 (8)과 six-tenth rule 식 (9)를 적용하여 산출하였다.

$$Cost^{total} = Cost1 + Cost^{pipe1} + Cost^{pipe2}$$

$$-\sum pipelinecost1_{t,h,j,j'} - \sum pipelinecost2_{t,sx,yy,h,j} + SMRcost \quad (7)$$

$$C_A = C_0 \left(\frac{I_A}{I_0} \right) \quad (8)$$

$$C_B = C_A \left(\frac{S_B}{S_A} \right)^{0.6} \quad (9)$$

2005년을 기준으로 약 10,000 ton/season의 수소를 생산해내는 SMR 공정의 경우 전체 투자 비용이 약 368.5\$MM이며[15], 2005년과 2013년의 CEPCI를 가지고 식 (8)을 사용하여 우선 10,000 ton/season의 생산량을 가지는 SMR 공정의 전체 투자 비용을 계산해 낸다. 식 (8)의 결과값과 통합된 네트워크 모델을 적용시킬 실제 산업 단지에서의 필요로 하는 수소 생산량에 대한 데이터를 식 (9)에 대입하면 2005년 약 10,000 ton/season의 수소를 생산하는 SMR 공정의 전체 투자비용을 기준으로 하여 현재시점에서 SMR 공정의 전체 투자비용을 계산해 낼 수 있다.

2-2-3. 제약조건

제안된 통합 모델의 제약 조건은 크게 유틸리티 네트워크와 관련된 부분과 수소 네트워크와 관련된 부분으로 나뉘어진다.

2-2-3-1. 유틸리티 네트워크

유틸리티 네트워크의 경우 기본적인 제약조건은 다음과 같다.

$$D_{t,i,p} \leq x_{t,i,k,p}, "CON" \quad (10)$$

$$x_{t,i,k,p}, "CON" = \sum_f e_{t,i,f,k,p} \quad (11)$$

$$\frac{b_{t,i,d,p,l}}{M} \leq x_{t,i,d,p,l} \leq b_{t,i,d,p,l} \times M, M \text{ large positive value} \quad (12)$$

$$\frac{br_{t,i,i,f}}{M} \leq r_{t,i,i,f} \leq br_{t,i,i,f} \times M \quad (13)$$

식 (10)과 같이 각 공장에서의 스팀 수요량 이상의 스팀이 소비되어야 한다. 스팀의 소비량은 식 (11)과 같이 어느 공장 내에 존재하는 모든 스팀 헤더에서 스팀을 필요로 하는 공정으로 주입되는 스팀 수송량과 동일하다. 스팀을 생산하기 위한 보일러의 사용 여부는 식 (12)와 같이 이진법 변수로 결정되며 각 공장들 사이의 스팀 수송량

역시 식 (13)과 같이 이진법 변수로 결정된다. 유틸리티 네트워크를 구성하는 제약조건들은 fuel tank, splitter와 mixer, boiler, turbine, steam header, letdown unit, water unit, electricity unit과 관련하여 총 7가지 경우로 크게 나뉘어진다. 각각에 해당되는 제약조건 식들은 기존에 연구되었던 논문을 참조하였다[8]. 유틸리티 네트워크의 제약조건 식들 중에서 수소 네트워크 모델과 직접적으로 연결되는 부분은 잉여 스팀이 발생하는 부분인데 이는 스팀 헤더와 관련된 제약조건 식에 들어가 있다.

2-3-2-2. 수소 네트워크

수소 네트워크의 경우는 제약조건과 관련된 식들이 유틸리티 네트워크에 비하여 간단하다. 기본적으로 식 (14)와 같이 수소 네트워크를 구성하는 공장들이 필요로 하는 수소 수요량을 충족시키며 유틸리티 네트워크와 마찬가지로 수소의 수송량은 수요량은 식 (15)와 (16)과 같이 이진법 변수로 결정된다.

$$H_{t,j,h} \leq y_{t,j,s,h,l} \quad (14)$$

$$\frac{c_{t,j,s,h,l}}{M} \leq y_{t,j,s,h,l} \leq c_{t,j,s,h,l} \times M, M \text{ large positive value} \quad (15)$$

$$\frac{cr_{t,j,j'}}{M} \leq S_{t,j,j'} \leq cr_{t,j,j'} \times M \quad (16)$$

네트워크를 구성하는 파이프 라인에 관련된 제약조건은 유틸리티 네트워크의 경우와 확연히 차이점을 가진다. 유틸리티 네트워크의 경우 파이프 길이에 대한 간단한 선형관계가 형성되지만 수소 네트워크의 경우 컴프레서가 추가되기 때문에 거리뿐만 아니라 면적, 컴프레서 전원, 주입 압력 등등 복잡하고 다양한 비선형 제약조건 식들이 들어가 있다[21,22]. 이 부분은 앞서 언급했듯이 기존의 일반적인 최적화 기법과는 다소 다른 접근을 통하여 비선형 제약조건 식들을 처리하였다. 더불어 유틸리티 네트워크에서 발생하는 잉여 스팀을 SMR 공정을 거쳐 수소로 생산하는 과정에서 스팀 대 수소 전환 비율을 0.1로 가정하였다[15,23].

2-3-2-3. 스팀과 수소 통합 네트워크

유틸리티 네트워크와 수소 네트워크를 통합하는 과정에 가장 중요한 부분은 기존의 유틸리티 네트워크에서 발생하는 잉여 스팀 외에 수소 네트워크의 수소 수요를 충족시키기 위하여 얼마나 더 많은 스팀을 추가로 발생시켜야 하나라는 것이다.

$$v_{t,i,f,p} \cdot \text{ratio} \geq y_{t,j,s,h,l} \quad (17)$$

$$v_{t,i,f,p} \geq h_Q3_{t,i,sx,yy,f} \quad (18)$$

스팀이 SMR 공정을 거쳐 수소로 전환되는 비율은 약 0.1이다[15,23]. 식 (17)에서 알 수 있듯이 전환된 수소의 양은 수소 네트워크에서 각 공장이 소비하는 수소의 양보다 많아야 한다. 식 (18)은 유틸리티 네트워크에서 남은 스팀의 양은 유틸리티 네트워크와 SMR 공정을 연결한 파이프 라인 내의 스팀의 수송 양보다 많아야 함을 의미한다.

Table 1. Water demand of companies (10³ton/season)

Company	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Season	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t1	0	119	119	0	0	0	99	238	99	497	437	119	199	497	397
t2	0	119	119	0	0	0	99	238	99	497	437	119	199	497	397
t3	0	119	119	0	0	0	99	159	0	457	358	119	199	497	397
t4	0	119	119	0	0	0	99	159	0	457	358	119	199	497	397

Table 2. Electricity demand of companies (MWh/season)

Season \ Company	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t1	99	199	159	99	40	0	99	199	139	238	238	99	139	397	338
t2	99	199	159	99	40	0	99	199	139	238	238	99	139	397	338
t3	99	159	159	99	40	0	99	199	139	238	238	99	139	358	298
t4	99	159	159	99	40	0	99	199	139	238	238	99	139	358	298

Table 3. Steam demand of companies (10³ton/season)

Season	Company	VHS	HS	MS	LS
t1	1	0	0	70	0
	2	0	0	183	278
	3	0	0	119	99
	4	0	0	28	40
	5	0	0	0	12
	6	0	0	0	0
	7	0	0	0	50
	8	0	129	91	16
	9	0	0	334	191
	10	894	894	0	0
	11	894	1081	342	229
	12	0	0	62	364
	13	0	229	68	28
	14	1212	445	419	227
	15	837	147	131	141
t2	1	0	0	60	0
	2	0	0	99	159
	3	0	0	119	99
	4	0	0	28	40
	5	0	0	0	12
	6	0	0	0	0
	7	0	0	0	50
	8	0	99	70	0
	9	0	0	219	139
	10	874	596	0	0
	11	854	795	342	229
	12	0	0	40	238
	13	0	229	60	28
	14	1192	417	419	219
	15	837	139	131	129
t3	1	0	0	50	0
	2	0	0	40	79
	3	0	0	109	89
	4	0	0	20	36
	5	0	0	0	10
	6	0	0	0	0
	7	0	0	0	40
	8	0	52	46	0
	9	0	0	133	0
	10	860	318	0	0
	11	825	686	342	229
	12	0	0	20	109
	13	0	219	50	28
	14	1164	413	419	191
	15	823	125	131	119

Table 3. continued

Season	Company	VHS	HS	MS	LS
t4	1	0	0	56	0
	2	0	0	99	159
	3	0	0	119	99
	4	0	0	24	40
	5	0	0	0	12
	6	0	0	0	0
	7	0	0	0	50
	8	0	79	70	0
	9	0	0	219	139
	10	874	397	0	0
	11	854	795	342	229
	12	0	0	40	238
	13	0	229	60	28
	14	1172	417	419	219
	15	831	139	131	129

Table 4. Hydrogen demand of companies (ton/year)

Company	Hydrogen demand
r1	11571.43
r2	19285.71
r3	11571.43
r4	6171.43
r5	7714.29

3. 결과 및 고찰

3-1. 사례연구 설정: 여수 산업 단지

여수 산업 단지는 국내 최대 규모를 자랑한다. 따라서 여수 산업 단지를 기반으로 연구된 논문이 많으며 이를 통하여 기본적인 데이터(유틸리티 수요량, 수소 수요량, 파이프 관련 상수들 등등)를 제공받았다[3,12]. 유틸리티 네트워크를 구성하는 15개의 공장들과 수소 네트워크를 구성하는 5개의 공장들을 바탕으로 통합된 모델을 구축하였다. 통합된 네트워크 모델에서 가장 중요한 부분은 각각의 개별 네트워크를 구성하는 공장들이 필요로 하는 물질들의 수요를 충족시키는 것이다. 유틸리티 네트워크의 경우 전체 15개의 공장을 기준으로 물, 전력, 4종류의 스팀 수요에 대한 데이터가 Table 1, 2, 3에 나타나 있다.

수소 네트워크 경우 총 5개의 공장에 대한 수소 수요에 대한 데이터가 Table 4에 나타나 있다.

유틸리티 네트워크의 데이터는 계절 별로 구성되어 있기에 이를 기준으로 하여 모델을 만들기 위하여 연간 수소 수요량을 4등분하였다. 통합된 네트워크 모델에서 유틸리티 네트워크가 구성되어 있는 부분과 수소 네트워크가 구성되어 있는 부분, 그리고 가상으로 설정

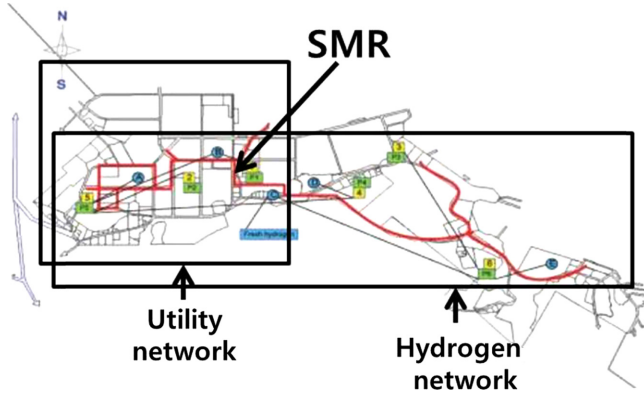


Fig. 2. The region of utility network (left box) and hydrogen network (long box) and the location of SMR process in Yeosu industrial complex.

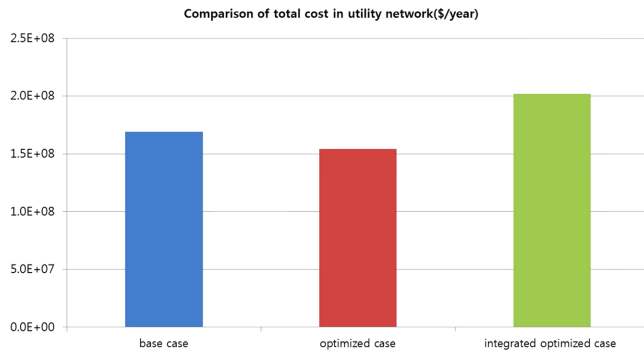


Fig. 3. Comparison of the total cost in utility network (\$/year).

한 SMR 공정의 위치에 대하여 Fig. 2에 나타나 있다.

3-2. 사례연구 결과

본 논문에서 제시하는 통합 모델은 혼합 정수 선형 계획법(MILP)에 따라 식을 구성하였고, 최적화 상용 프로그램인 GAMS[24]를 사용하여 문제를 구현하였다.



Fig. 4. Current utility network of Yeosu industrial complex.

3-2-1. 유틸리티 네트워크 결과

기존 유틸리티 네트워크 최적화 연구와 관련된 결과와 통합된 네트워크 모델에서의 유틸리티 네트워크에 대하여 비용적 측면과 네트워크 구성적 측면을 살펴보면 다음과 같다.

3-2-1-1. 유틸리티 네트워크의 비용적 측면

유틸리티 네트워크의 전체 비용과 관련하여 현재 여수 산업단지에서 운영되고 있는 실제 경우에 대한 결과, 유틸리티 네트워크만 고려한 기존 연구의 결과, 통합된 네트워크 모델에서의 유틸리티 네트워크 비용에 대한 결과 비교가 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 통합된 네트워크 모델에서의 유틸리티 네트워크의 전체 비용이 가장 높음을 볼 수 있다. 이는 수소 네트워크와 유틸리티 네트워크가 통합되면서 수소 네트워크의 수소 수요를 충족시키기 위하여 충분한 양의 스팀이 유틸리티 네트워크에서 추가로 나오므로써 더 많은 비용이 들어갔기 때문이다.

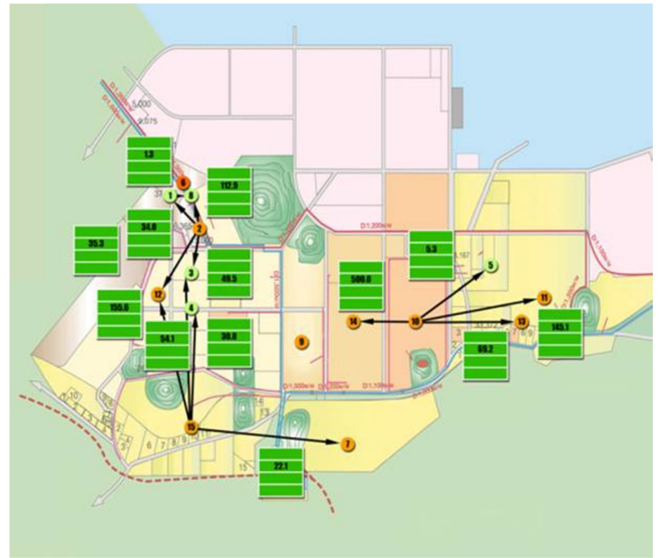


Fig. 5. Optimized utility network of Yeosu industrial complex from the existing study.

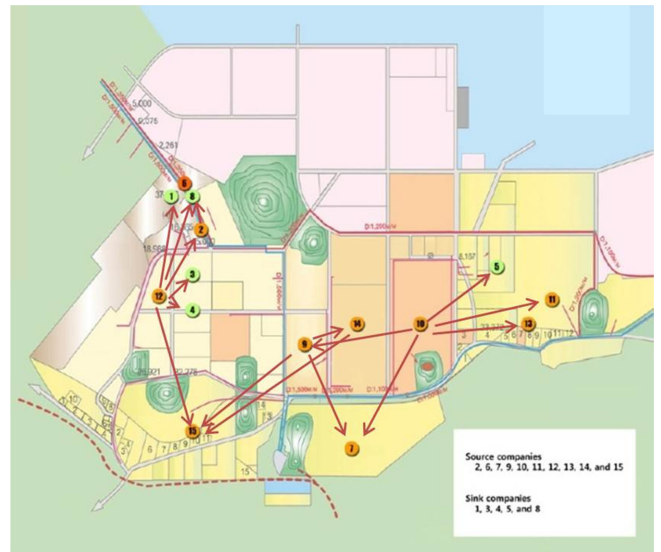


Fig. 6. Optimized utility network of Yeosu industrial complex from integrated model.

Table 5. Steam type and amount between companies in utility network (ton/season)

From	To	Steam type	Amount
2	8	HS	129,000
9	7	MS	5,000
9	14	MS	304,700
9	15	MS	215,840
10	5	HS	5,000
10	5	HS	21,190
10	7	HS	5,000
10	9	HS	5,000
10	11	MS	349,580
10	13	HS	36,900
10	13	HS	104,430
12	1	MS	70,000
12	2	MS	200,220
12	3	MS	214,030
12	4	MS	70,857
12	8	MS	104,330
12	15	MS	49,450
14	15	HS	147,000

Table 6. Additional steam amount to be inlet source of SMR process (ton/season)

Company	VHS	HS	MS	LS
2		5000		
2			5000	
2				5000
3				785.71
4				5000
5		5000		
5			5000	
5				5000
7		5000		
7			5000	
7				5000
9		5000		
9			5000	
9				5000
10	5000			
10		5000		
10			5000	
10				5000
11	5000			
11		5000		
11			5000	
11				5000
13		5000		
13			5000	
13				5000
14	5000			
14		5000		
14			5000	
14				5000

3-2-1-2. 유틸리티 네트워크의 구성적 측면

Fig. 4은 현재 여수 산업단지에서의 유틸리티 네트워크 구성도이

다. Fig. 5는 유틸리티 네트워크만 고려한 기존 최적화 연구 결과로 얻어진 구성도이다[3]. Fig. 6는 통합된 네트워크 모델에서의 유틸리티 네트워크의 구성도이다. 각 그림을 보면 알 수 있듯이 실제로 운영되고 있는 유틸리티 네트워크 구성도 보다 기존의 최적화 연구를 통하여 얻어진 유틸리티 네트워크의 구성도가 더 복잡하면서 긴밀한 관계가 구축되었음을 알 수 있다. 더불어 기존의 최적화 연구를 통하여 얻어진 구성도보다 본 연구에서 수행한 통합된 네트워크 모델 내의 유틸리티 네트워크 구성도가 더 복잡하면서 긴밀하게 공장들이 연결되어 있음을 알 수 있다. 이 역시 수소를 생산하기 위하여 기존에 발생하던 잉여 스팀보다 더 많은 양의 스팀을 배출해야 함으로서 생긴 현상이다. Fig. 6에서 각 화살표 별로의 스팀 수송량에 대한 결과는 Table 5에서 확인할 수 있다.

Table 6은 SMR 공정에 주입되기 위하여 발생하는 스팀의 양과 발생 공장에 대한 표이다. 각 공장 별로 스팀 유형에 따른 최대 생산량이 정해져 있기에 다양한 공장에서 SMR 공정에 스팀을 공급하기 위하여 추가로 스팀을 생산하고 있으며 이에 따라 연료 및 파이프 설치, 운영 비용이 추가 됨으로써 Fig. 3 및 Fig. 6과 같은 결

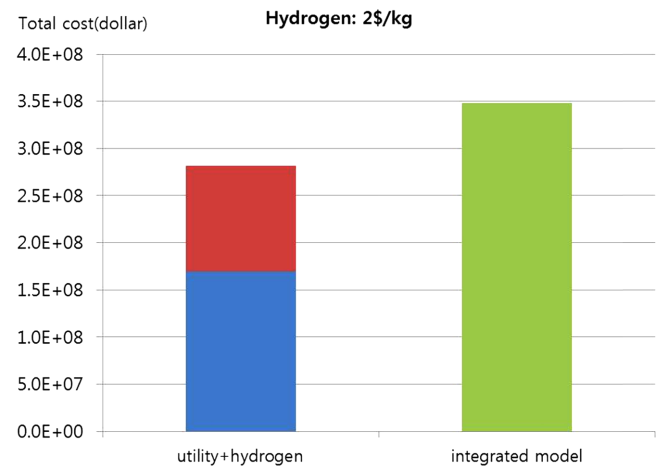


Fig. 7. Comparison of the total cost (left: the summation of each existing utility network and hydrogen network, right: the total cost of integrated model, hydrogen cost: 2\$/kg).

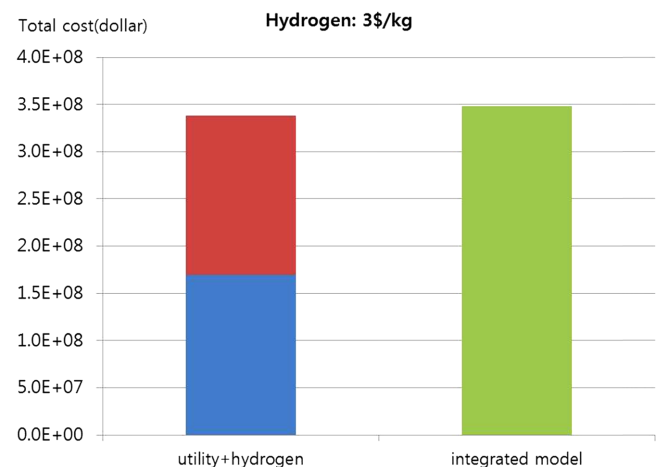


Fig. 8. Comparison of the total cost (left: the summation of each existing utility network and hydrogen network, right: the total cost of integrated model, hydrogen cost: 3\$/kg).

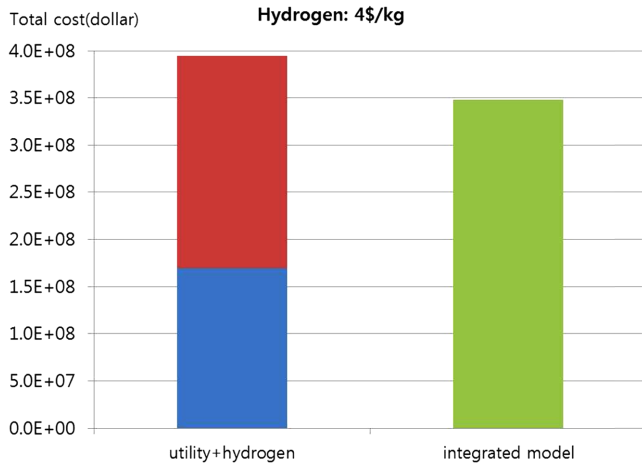


Fig. 9. Comparison of the total cost (left: the summation of each existing utility network and hydrogen network, right: the total cost of integrated model, hydrogen cost: 4/kg).

Table 7. Hydrogen amount between companies in hydrogen network (ton/season)

from SMR to hydrogen sink		from a sink to other sink	
t1	r1	2892	
	r2	4821	
	r3	2892	
	r4	3471	
		r5	1982

과가 얻어진 것이다.

3-2-2. 민감도 분석

앞선 유틸리티 네트워크의 결과만 보아도 알 수 있듯이 수소 네트워크의 각 공장들의 수소 수요는 통합된 네트워크 모델의 구성에 민감한 역할을 한다. 통합된 네트워크 모델의 전체 비용과 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크가 독립적으로 움직이면서 산출되는 각각의 전체 비용의 합을 민감도 분석을 통하여 비교하였다. 수소 네트워크의 경우 유틸리티 네트워크와 독립적으로 운영된다면 외부에서 수소를 구매하여 각 공장의 수소 수요를 충족시켜야 한다. 따라서 본 연구에서 수소 구매 가격을 민감도 분석의 기준으로 두었다. 수소의 가격을 kg당 2, 3, 4 dollar로 나누어 전체 비용을 비교하였으며 그 결과는 Fig. 7, 8, 9에 나타나 있다.

수소의 구매 가격이 kg당 4 dollar부터는 통합된 네트워크 모델의 전체 비용이 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크가 독립적으로 운영되어 산출되는 각각의 전체 비용의 합보다 더 낮음을 확인할 수 있다. 현재 통합된 네트워크 모델의 전체 비용에 SMR 공정의 설치 및 운영 비용이 포함되어 있지만 감가상각은 고려하지 않았다. 따라서 SMR 공정의 감가상각이 고려된다면 더 많은 경제적 이득을 얻을 것이라 예상된다. 더불어 통합된 네트워크 모델에서의 수소 네트워크 구성 및 수소 수송량에 대한 결과는 Table 7과 같다.

4. 결 론

본 연구에서는 대규모 석유 화학 단지를 대상으로 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크의 통합을 위한 결정론적 최적화 모델을 개발

하였다. 제안된 모델은 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크 사이에 SMR 공정을 추가 및 통합하여 유틸리티와 수소의 수요를 충족시키기 위하여 전체 네트워크의 구축과 설치 및 운영 비용, 각 네트워크 내에서의 물질 수송량 등을 결정한다. 제안된 모델의 타당성을 평가하고 검증하기 위하여 기존에 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크 연구에 배경 장소가 되었던 여수 석유 화학 산업 단지를 대상으로 통합된 네트워크 모델을 적용시켜 보았다. 수소 네트워크의 수요를 충족시키기 위하여 다량의 스팀을 추가로 생산해야 하기에 유틸리티 네트워크에서는 기존 보다 더 복잡한 네트워크가 형성되었으며 유틸리티 네트워크에 대해서만 비용 분석을 한 결과 더 높은 비용이 산출되었지만 민감도 분석을 통하여 통합된 네트워크 모델의 전체 비용과 유틸리티 네트워크와 수소 네트워크가 지금까지 독립적으로 운영되어 각각의 전체 비용을 따로 계산하여 합한 값을 비교한 결과 통합된 네트워크 모델의 전체 비용이 더 낮은 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

Nomenclatures

Indices

d	: boiler
f	: steam header
m	: fuel
h	: hydrogen
i	: company(utility network)
j	: company(hydrogen network)
k	: process
l	: state
n	: water
p	: steam
q	: SO _x
r	: greenhouse gas
s	: SMR
sx	: x-coordinate
sy	: y-coordinate
t	: time period

Parameter

pri_m	: price of fuel [\$/ton]
pri_n	: price of water [\$/ton]
$pri^{Electricity}$: price of electricity [\$/kWh]
pri_q	: price of SO _x [\$/ton]
pri_r	: price of greenhouse gas [\$/ton]
$a_{t,i,i,f}^{Invest}$: fixed investment cost [\$/yr·km]
$\alpha_{t,i,i,f}^{Oper}$: fixed operating cost [\$/yr·km]
$b_{t,i,i,f}^{Invest}$: variable investment cost [\$/yr·ton]
$\beta_{t,i,i,f}^{Oper}$: variable operating cost [\$/yr·ton]
$Dist_{i,i'}$: distance between source and sink companies [km]
$pL_{h,j,j'}$: distance between companies in hydrogen network [km]
$pL_{sx,sy,j}$: distance between a company (in hydrogen network) and SMR process [km]

$pL3_{i,ss,yy}$: distance between a company (in utility network) and SMR process [km]
$Pcost$: pipeline cost parameter [\$/yr-km]
DP	: depreciation parameter
$SMRcost$: SMR process capital and operating cost [\$/yr]
C_A	: current cost[\$]
C_0	: base cost [\$/yr]
I_A	: current index
I_0	: base index
C_B	: the approximate cost of equipment having size S_B [\$/yr]
C_A	: the known cost of equipment having corresponding size S_A [\$/yr]
S_B	: size factor
S_A	: size factor
$D_{t,i,p}$: steam demand [ton/yr]
$H_{t,j,h}$: hydrogen demand [ton/yr]
M	: big number
$Cost^{total}$: total cost [\$/yr]
$Cost^{pipe1}$: total capital and operating cost 1 [\$/yr]
$Cost^{pipe2}$: total capital and operating cost 2 [\$/yr]
$ratio$: ratio of steam to hydrogen

Variable

$b_{t,i,d,p,l}$: binary variable of steam amount at boiler
$br_{t,i,i',f}$: binary variable of steam transfer (utility network)
$c_{t,j,s,h,l}$: binary variable of hydrogen amount
$cr_{t,j,j'}$: binary variable of hydrogen transfer
$C_{t,i}^{Raw}$: total raw material cost [\$/yr]
$C_{t,i}^{Invest}$: total investment cost [\$/yr]
$C_{t,i,i',f}^{Oper}$: total operating cost [\$/yr]
$CostI$: nominal total cost [\$/yr]
$e_{t,i,f,k,p}$: steam exchange between steam header and process [ton/yr]
$h_X3_{t,i,ss,yy,f}$: binary variable of steam transfer (utility network-SMR)
$h_Q3_{t,i,ss,yy,f}$: steam transfer (utility network-SMR)
$h_X_{t,h,j,j'}$: binary variable of hydrogen transfer (hydrogen network)
$h_X2_{t,ss,yy,h,j}$: binary variable of hydrogen transfer (SMR-hydrogen network)
$pipelinecost1_{t,h,j,j'}$: nominal pipeline cost 1 [\$/yr]
$pipelinecost2_{t,ss,yy,h,j}$: nominal pipeline cost 2 [\$/yr]
$r_{t,i,i',f}$: steam transfer [ton/yr]
$s_{t,j,j'}$: hydrogen transfer [ton/yr]
$v_{t,i,f,p}$: steam vents [ton/yr]
$x_{t,i,d,m,"CON"}$: fuel amount at boiler [ton/yr]
$x_{t,i,d,m,"IN"}$: water amount at boiler [ton/yr]
$x_{t,i,d,q,"GEN"}$: SO _x amount at boiler [ton/yr]
$x_{t,i,d,r,"GEN"}$: greenhouse gas amount at boiler [ton/yr]
$x_{t,i,k,p,"CON"}$: material amount at process [ton/yr]
$x_{t,i,d,p,l}$: steam amount at boiler [ton/yr]
$y_{t,j,s,h,l}$: hydrogen amount [ton/yr]
$y_{t,i,"IN"}$: electricity amount [kWh/yr]

References

1. Harland, C. M., Supply Chain Management: Relationships, Chains and Networks," *Brit. J. Manage.*, **7**(1), 63-80(1996).
2. Anderson, S. and Newell, R., "Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies," *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **29**(1), 109-142(2004).
3. Kim, S.-H., Yoon, S.-G., Chae, S.-H. and Park, S., "Economic and Environmental Optimization of a Multi-site Utility Network for an Industrial Complex," *J. Environ. Manage.*, **91**(3), 690-705(2010).
4. Wang, Y., Chu, K. H. and Wang, Z., "Two-step Methodology for Retrofit Design of Cooling Water Network," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**(1), 274-286(2014).
5. Li, Z., Zhao, L., Du, W. and Qian, F., "Modeling and Optimization of the Steam Turbine Network of an Ethylene Plant," *Chin. J. Chem. Eng.*, **21**(5), 520-528(2013).
6. Midilli, A., Ay, M., Dincer, I. and Rosen, M. A., "On Hydrogen and Hydrogen Energy Strategies: I: Current Status and Needs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **9**(3), 255-271(2005).
7. Eberle, U., Felderhoff, M. and Schuth, F., "Chemical and Physical Solutions for Hydrogen Storage," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **48**(36), 6608-30(2009).
8. Kim, J. and Moon, I., "Strategic Design of Hydrogen Infrastructure Considering Cost and Safety Using Multiobjective Optimization," *Int. J. Hydrogen Energy*, **33**(21), 5887-5896(2008).
9. Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L. and Wang, Y., "An Overview of Hydrogen Production Technologies," *Catal. Today*, **139**(4), 244-260(2009).
10. Han, J.-H., Ryu, J.-H. and Lee, I.-B., "A Preliminary Infrastructure Design to Use Fossil Fuels with Carbon Capture and Storage and Renewable Energy Systems," *Int. J. Hydrogen Energy*, **37**(22), 17321-17335(2012).
11. Han, J.-H., Ryu, J.-H. and Lee, I.-B., "Modeling the Operation of Hydrogen Supply Networks Considering Facility Location," *Int. J. Hydrogen Energy*, **37**(6), 5328-5346(2012).
12. Jeong, C. and Han, C., "Byproduct Hydrogen Network Design Using Pressure Swing Adsorption and Recycling Unit for the Petrochemical Complex," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **50**(6), 3304-3311(2011).
13. Hallikas, J., Karvonen, I., Pulkkinen, U., Virolainen, V. and Tuominen, M., "Risk Management Processes in Supplier Networks," *Int. J. Prod. Econ.*, **90**(1), 47-58(2004).
14. Gim, B., Kim, J.-W. and Choi, S. J., "The Status of Domestic Hydrogen Production, Consumption, and Distribution," *Trans Korean Hydrog New Energy Soc.*, **16**(4), 391-399(2005).
15. Nexant Inc., *Equipment Design and Cost Estimation for Small Modular Biomass Systems, Synthesis Gas Cleanup, and Oxygen Separation Equipment*, NREL Technical Report No. NREL/SR-510-39946(2006).
16. Miller, H. J. and Shaw, S.-L., *Geographic Information Systems for Transportation: Principles and Applications*. Oxford University Press, New York, NY(2001).
17. Han, J.-H., Ahn, Y.-C., Lee, J.-U. and Lee, I.-B., "Optimal Strategy for Carbon Capture and Storage Infrastructure: A Review," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**(8), 975-984(2012).
18. Han, J.-H. and Lee, I.-B., "Strategic Planning of Carbon Capture & Storage (CCS) Infrastructure Considering the Uncertainty in the

- Operating Cost and Carbon Tax," *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**(3), 471-478(2012).
19. Lozowski, D., "Chemical engineering plant cost index (CEPCI)," *Chem. Eng.*, **119**(1), 84(2012).
20. Williams, R., "Six-tenths Factor Aids in Approximating Costs," *Chem. Eng.*, **54**(12), 124-125(1947).
21. Lim, Y. and Suh, S.-S., "Adsorption Characteristics of Carbon Dioxide and Nitrogen on Zeolite 13X," *Appl. Chem.*, **16**(1), 61-64(2012).
22. Amos, W. A., "Costs of Storing and Transporting Hydrogen," NREL Technical Report No. NREL/TP-570-25106(1998).
23. Molburg, J. C. and Doctor, R. D., "Hydrogen from Steam-methane Reforming with CO₂ Capture. 20th Annual International Pittsburgh Coal Conference," September 15-19, Pittsburgh(2003).
24. Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. and Rosenthal, R., "GAMS: A User's Guide," Course Technology(1988).