

이산화탄소 원료 공급의 불확실성을 고려한 미세조류 기반 바이오 디젤 공급 네트워크 최적화

안유찬* · 김정환*[†] · 한지훈**[†] · ***[†]

*한국생산기술연구원 친환경재료공정그룹

44413 울산광역시 중구 중가로 55

**전북대학교 반도체·화학공학부

54896 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567

***전북대학교 화학공학부

54896 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567

(2020년 3월 7일 접수, 2020년 3월 19일 수정본 접수, 2020년 4월 7일 채택)

Optimization of Microalgae-Based Biodiesel Supply Chain Network Under the Uncertainty in Supplying Carbon Dioxide

Yuchan Ahn*, Junghwan Kim**[†] and Jeehoon Han***[†]

*Green Materials & Processes R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, 55, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44413, Korea

**School of Semiconductor and Chemical Engineering, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54896, Korea

***School of Chemical Engineering, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 54896, Korea
(Received 7 March 2020; Received in revised form 19 March 2020; accepted 7 April 2020)

요 약

전세계적으로 화석 연료가 고갈 되면서 화석 연료를 대체할 수 있는 자원이 필요한 실정이며, 대체 자원으로는 바이오 연료가 각광을 받고 있다. 바이오 연료는 바이오 매스로부터 생산되는데 바이오 매스는 바이오 연료 및 바이오 화학제품 생산이 가능한 재생 가능 자원이다. 특히, 화석 연료를 대체하기 위하여 이산화탄소와 바이오 매스를 이용하여 바이오 연료(바이오 디젤)를 생산하는 연구가 주목을 받고 있다. 바이오 매스를 기반으로 하여 바이오 디젤을 생산하기 위해서는 바이오 디젤 생산에 필요한 원료(예, 이산화탄소, 물)와 잠재적인 바이오 매스 리사이클링 용량 및 설치 위치, 생산된 바이오 디젤의 수요 도시까지의 공급을 모두 고려하는 공급 네트워크 개발이 필요하다. 바이오 매스를 이용한 바이오 디젤 공급 네트워크에 대하여 많은 연구가 수행이 되었지만, 미세조류 기반 최적의 바이오 디젤 생산 전략에 상당히 영향이 있는 이산화탄소 공급량에 대한 불확실성을 고려한 연구는 거의 수행되지 않았다. 미세조류 기반 바이오 디젤을 생산 시 상당히 중요한 원료로 이용되는 이산화탄소는 화력발전소에서 발생하는 배출 가스로부터 포집하여 사용하기 때문에 이산화탄소 공급량의 불확실성은 최적의 바이오 디젤 네트워크를 구축하는데 큰 영향이 있다. 따라서, 본 연구에서는 이산화탄소 공급량의 불확실성을 고려하는 최적 공급 네트워크 설계를 결정하기 위해 2단계 확률 모델을 개발한다. 이 모델의 목표는 이산화탄소 공급량 불확실성을 고려하고 각 지역의 디젤 요구량을 충족시키면서 총 네트워크 비용을 결정하는 것이다. 이 모델은 대한민국의 디젤 수요량의 10%를 충족시키는 사례 연구를 평가하였다. 확률론적 모델(연간 갤런당 12.9 미국 달러)에 의해 결정된 최적의 바이오 디젤 공급 비용은 결정론적 모델(연간 갤런당 10.5 미국달러)의 결과보다 약간(26%) 높다. 이산화탄소 공급량이 변동되는 경우(확률론적 모델)는 바이오 디젤 공급 네트워크 전략에 상당한 영향을 미쳤다.

Abstract – As fossil fuels are depleted worldwide, alternative resources is required to replace fossil fuels, and biofuels are in the spotlight as alternative resources. Biofuels are produced from biomass, which is a renewable resource to produce biofuels or bio-chemicals. Especially, in order to substitute fossil fuels, the research focusing the biofuel

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kjh32@kitech.re.kr, jhhan@jbnu.ac.kr

‡이 논문은 POSTECH 이인범 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.

(biodiesel) production based on CO₂ and biomass achieves more attention recently. To produce biomass-based biodiesel, the development of a supply chain network is required considering the amounts of feedstocks (ex, CO₂ and water) required producing biodiesel, potential locations and capacities of bio-refineries, and transportations of biodiesel produced at bio-refineries to demand cities. Although many studies of the biomass-based biodiesel supply chain network are performed, there are few types of research handled the uncertainty in CO₂ supply which influences the optimal strategies of microalgae-based biodiesel production. Because CO₂, which is used in the production of microalgae-based biodiesel as one of important resources, is captured from the off-gases emitted in power plants, the uncertainty in CO₂ supply from power plants has big impacts on the optimal configuration of the biodiesel supply chain network. Therefore, in this study, to handle those issues, we develop the two-stage stochastic model to determine the optimal strategies of the biodiesel supply chain network considering the uncertainty in CO₂ supply. The goal of the proposed model is to minimize the expected total cost of the biodiesel supply chain network considering the uncertain CO₂ supply as well as satisfy diesel demands at each city. This model conducted a case study satisfying 10% diesel demand in the Republic of Korea. The overall cost of the stochastic model (US\$ 12.9/gallon-y) is slightly higher (23%) than that of the deterministic model (US\$ 10.5/gallon-y). Fluctuations in CO₂ supply (stochastic model) had a significant impact on the optimal strategies of the biodiesel supply network.

Key words: Microalgae, Biodiesel, Supply chain network, Carbon dioxide, Uncertainty, Optimization

1. 서 론

전 세계적으로 에너지 수요가 증가하면서 화석 연료를 연소시켜 에너지 수요의 상당 부분을 충족시키는 상태이며 이로 인하여 배출되는 온실가스는 대기 오염 문제를 발생시키고 있다[1-3]. 배출되는 온실가스를 감축하기 위하여 바이오 연료(예, 바이오 에탄올, 바이오 부탄올, 바이오 가솔린 등)가 대체 연료로 각광을 받고 있는데 바이오 연료는 전 세계적으로 증가하는 에너지 수요를 충족시키는 것과 함께 배출되는 온실 가스를 감축시킬 수 있다[4-6]. 바이오 연료는 화석연료와는 다른 재생 가능한 에너지이며 대체적으로 바이오 매스로부터 얻을 수 있는 연료로 살아 있는 유기체뿐만 아니라 동물의 배설물 등 대사활동에 의한 부산물을 포함하는 연료이다. 바이오 연료를 사용하기 위해 미국에서는 콩과 옥수수를 재배하거나 유럽에서는 아마씨나 평지씨 등이 재배되고 있고 가정이나 산업체의 유기물 쓰레기를 바이오 연료로 전환해 사용하고 있다. 바이오 연료는 다음의 세가지 바이오 매스를 기반으로 생산할 수 있다[7-11]: (1) 1세대 바이오 매스(예, 대두, 옥수수, 사탕수수 등); (2) 2세대 바이오 매스(예, 역새, 농작물의 짚질, 폐목재 등); (3) 3세대 바이오 매스(예, 미세조류 등). 여러 종류의 바이오 매스를 이용하여 바이오 연료를 생산하기 위해 바이오 매스를 효과적으로 사용하고 시장에 바이오 연료를 판매하기 위한 소규모 바이오 연료 생산 공정을 설계하는 여러 연구가 수행되었다[12-19]. 1세대 바이오 매스는 대두, 옥수수나 사탕수수로부터 발효시켜 바이오 연료를 생산하며 공정이 간단하고 생산비용이 저렴하나, 넓은 경작지가 필요하고 대두, 옥수수나 사탕수수는 사람이 먹는 음식이므로 바이오 연료 생산을 위한 원료로 1세대 바이오 매스를 사용 시 식량 공급 부족 문제가 발생한다[20, 21]. 2세대 바이오 매스는 역새, 농작물의 짚질이나 폐목재로부터 바이오 연료를 생산할 수 있으며 1세대 바이오 매스가 가지는 식량 공급 부족 문제를 해결할 수 있지만, 경작 속도가 느리고 전처리 과정이 복잡해 효율성이 떨어지는 단점을 가진다[20, 21].

3세대 바이오 매스는 해수나 담수에 분포하는 조류로부터 바이오 연료를 생산하는데 해양 미세조류는 대기나 해수 중의 이산화탄소와 물, 태양광을 에너지원으로 삼기 때문에 대규모 경작지가 필요 없고, 원료로 이산화탄소를 사용하기 때문에 이산화탄소 저감에도 기여할 수 있어 기존 바이오 매스를 대체할 새로운 원료로 각광받고 있다. 특히, 지질 함량이 높고 번식과 성장이 빨라 기존의 바이오 매스에 비해 생산성이 월등히 높다는 장점이 있다[18, 21]. 그리하여 많

은 연구자들은 미세조류를 기반으로 하는 바이오 연료 생산의 기술 경제성 평가를 수행했다[22-27]. 그러나, 바이오 연료의 상업화를 위해서는 바이오 연료의 생산 및 분배에 대한 통합 인프라를 고려해야 한다. 이러한 통합 인프라를 구축하기 위하여 대부분의 연구자들은 자원을 효율적으로 공유 할 수 있는 막대한 에너지 시스템인 eco-industrial park를 고려하였으며, 이 단지는 다양한 미래 에너지 수요를 충족시킬 수 있는 비용 효율적이고 환경 친화적인 옵션으로 작용할 수 있다[28-32]. 산업 에너지 시스템을 위한 최적의 공정 설계 구성 문제를 다룬 기존 연구를 토대로 통합 된 대규모 바이오 연료 공급 네트워크 관리 인프라에 대한 경제적인 분석이 필요하다.

바이오 연료 공급 네트워크의 최적 관리에 대한 대부분의 이전 연구는 에탄올 생산을 위한 수요 클러스터(예, 바이오리파이너리, 수요 도시 등)로 공급 원료(예, 1세대 및 2세대 바이오 매스 등)를 운송하기 위한 바이오 에탄올 공급 네트워크를 위한 최적 네트워크 모델을 개발하였다[33-36]. 바이오 매스 공급 네트워크 관리 연구는 주로 1세대 및 2세대 바이오 매스의 이용을 고려했다. 그러나 두 가지 바이오 매스가 가지는 제약이 있기 때문에 바이오 연료(바이오 디젤) 공급 네트워크의 원료로 3세대 바이오 매스(미세 조류)를 사용하는 연구가 진행되었다[18, 21]. 기존의 연구[21]는 미세조류를 이용하여 바이오 디젤을 생산하는 공정에 대하여 바이오 디젤 공급 네트워크를 구축하고 비용 최소화를 목적으로 하여 최적의 바이오 디젤 생산 및 공급 전략을 도출하였다. 또한, 이 연구를 기반으로 다른 연구[37]는 디젤 수요의 불확실성을 고려하여 2030년의 대한민국의 디젤 수요를 충족시키기 위한 2단계 확률론적 모델을 개발하여 공급 네트워크의 최적의 전략을 도출하였다. 변화하는 디젤 수요의 불확실성을 고려하여 모델의 정확성을 한층 개선 시켰다. 그러나, 미세조류 기반 바이오 디젤은 이산화탄소를 원료로 사용하여 생산이 되므로 이산화탄소의 일정한 공급이 상당히 중요하며 바이오 디젤 공급 네트워크의 전략에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이산화탄소 공급량의 불확실성을 고려하여 시간에 따라 변화하는 바이오 연료 수요를 지닌 미래의 미세조류 기반 바이오 디젤 생산의 전략적 계획을 위한 수학적 모델(biodiesel supply chain network, BSCN)을 개발한다.

2장에서는 이 연구에 대한 문제를 설명하고 3장에서는 BSCN의 최적화 문제 내에서 고려된 목적 함수와 제약 조건에 대해 결정론적 방법과 확률론적 방법에 대하여 설명한다. 4장에서는 제안된 모델의 우수성을 입증하기 위한 사례 연구가 제시된다. 5장에서 결과가 제

시되고 마지막으로 6장에서는 결론을 제시한다.

2. 문제 구성

BSCN 모델의 설계 문제는 공급원(바이오 매스 성장을 위한 공급 원료)과 흡수원(수요 도시의 연료 공급) 사이의 연결 고리를 최적으로 구성하는 것을 목적으로 한다. 모델 개발을 위해 바이오리파이너리에서 바이오 디젤 생산, 화력발전소에서 이산화탄소 포집 및 저장 시스템(carbon capture and storage, CCS) 설치 후 이산화탄소 공급, 기설치된 하수 처리 시스템(wastewater treatment, WT)으로부터 물 공급, 바이오리파이너리에서 생산된 바이오 디젤 운송 방법에 대한 세부 정보를 제공한다.

2-1. 기술 개요

2-1-1. 바이오리파이너리

본 연구에서는 바이오 디젤 생산이 가능한 여러 종류의 바이오 매스 중에서 이산화탄소를 탄소원으로 사용하는 미세조류만을 고려한다. 미세조류는 광합성에 의해 이산화탄소와 영양분을 바이오 디젤로 전환시킨다. 미세조류는 두 가지 종류의 반응기에서 재배할 수 있다[18]: (1) 폐쇄형 광생물 반응기(photo-bioreactor, PBR); (2) 개방형 연못 반응기(open-pond reactor, OPR). PBR 시스템과 비교하여 OPR 시스템은 구성이 간단하고 비용이 저렴하지만 단위 면적당 미세조류의 성장 속도가 느리므로 PBR에 비해 더 많은 재배 면적을 필요로 하게 된다. 두 가지 타입의 반응기에서 정제된 오일을 생산한 후 트리글리세라이드 성분의 지방산 사슬에 존재하는 이중 결합을 포화시킴으로써 오일을 수소 처리를 통해 바이오 디젤로 업그레이드할 수 있다[18]. 미세조류로부터 바이오 디젤을 생산하기 위해서 본 연구에서는 두 종류의 미세조류 재배 시설 중에서 각 지역에서 최대한 종류 재배 시설 선택이 가능하며 이산화탄소 및 물 분 아니라 디젤 생산 시설에 필요로 하는 다른 공급 원료(예, 응집제, 수소, 부탄올 솔벤트 등)를 외부 구매로부터 제공하여 바이오 디젤을 생산한다.

2-1-2. CCS 시스템

이산화탄소는 지역 내 발전소로부터 발생된 배출가스를 CCS 시스템을 통하여 포집 후 바이오리파이너리에 공급한다. 높은 효율의 아민 기반 CCS 시스템에서 포집되는 이산화탄소는 액체 타입 이산화탄소(liquid CO₂, LCO₂), 기체 타입 이산화탄소(gas CO₂, GCO₂) 및 플루가스(flue gas, FG)의 세가지 형태로 구성된다[38]. 포집된 이산화탄소의 최적 비율은 CCS 시스템과 바이오리파이너리 사이의 거리에 의해 결정된다.

2-1-3. WT 시스템

WT 시스템은 이미 대한민국에 건설되어 운영되고 있는 시스템을 도입하는 것으로 가정하였으며, 바이오리파이너리 시설의 공급 원료인 물과 영양분은 WT 시스템으로부터 공급 가능하며 WT 시스템의 건설 비용은 무시된다. 다만, WT 시스템에서 물을 처리하기 위한 운영비용과 처리된 물을 바이오리파이너리로 공급하기 위해서 고려한 파이프라인의 설치 비용과 운영비용은 고려된다.

2-1-4. 운송 방법

BSCN에서 바이오리파이너리로의 공급 원료 및 수요 도시로 생산

된 디젤을 운송하는 방법에 대하여 두 가지 운송 방법을 고려한다: (1) 파이프라인; (2) 트럭. 파이프라인은 공급하고자 하는 원료나 제품을 안정적으로 제공할 수 있도록 설치 가능하며 운영 비용이 저렴하기 때문에 대량의 이산화탄소나 물을 공급하는 데 사용된다. 트럭은 생산된 바이오 디젤 운송에 사용하는데 그 이유는 바이오 디젤의 수요는 시간이 지남에 따라 지역 수요량이 달라질 수 있기 때문에 수요 변화에 대응하기 쉬운 트럭 운송 방법을 사용한다. 트럭 운송 방법을 이용하면 이러한 변화에 유연하게 대처할 수 있다.

2-2. 네트워크 구성

바이오 디젤 생산 및 공급 경로는 일반적인 공급 네트워크 기술을 고려하여 구성한다. 본 연구에서 다루는 설계 문제의 목적은 공급 원료, 바이오리파이너리 및 수요 도시의 위치와 이들 사이의 링크를 포함한 최적의 네트워크 구성을 결정하기 위해 부산물 판매에서 얻은 이익을 포함한 총 비용을 최소화하는 것을 목표로 한다. BSCN 모델(Fig. 1)은 공급 네트워크의 한 형태로 적용한다.

제안된 BSCN은 필요 원료(예, 이산화탄소, 물 등) 및 바이오 디젤 공급을 위한 소스 노드와 이를 사용하기 위한 싱크 노드(예, 바이오리파이너리, 수요 도시 등)로 구성된다. 각 소스 및 싱크 노드에는 바이오리파이너리, CCS 시스템, WT 시스템 및 수요 도시의 4가지 노드가 존재한다. 바이오리파이너리는 바이오 디젤 생산을 위한 공급 원료를 필요로 하며 바이오 디젤과 함께 부산물(나프타 및 전기)을 생산한다. 이들 공급 원료 중 이산화탄소 및 물은 CCS 및 WT 시스템에서 공급한다. 본 연구에서 발전소는 주요 이산화탄소 공급원으로 간주되며 충분한 이산화탄소를 얻을 수 있는 방법을 모델링 하기 위해 발전소는 세가지 용량(small, medium, large)의 CCS 시스템을 고려하였다. 특정 지역에 바이오리파이너리가 건설되면 공급 원료로서 충분한 이산화탄소를 공급할 수 있도록 최소한 하나의 CCS 시스템이 구축되어야 한다. 또한 CCS 및 WT 시스템을 위한 파이프라인 시스템은 이산화탄소 및 물을 바이오리파이너리로 공급할 수 있도록 구성되어야 한다. 바이오리파이너리에서 생산된 바이오 디젤은 트럭을 사용하여 운송한다.

제안된 BSCN 모델은 여러 가지 결정 변수를 고려하여 공급 노드에서 바이오리파이너리로의 이산화탄소, 물 및 바이오리파이너리에서 생산된 바이오 디젤의 수요 도시로의 디젤 흐름에 대한 BSCN의 최적 설계를 위한 총 비용을 최소화한다: (1) 바이오리파이너리의 개수, 위치 및 용량; (2) CCS 시스템의 개수, 위치 및 용량; (3) WT 시스템의 개수 및 위치; (4) 바이오리파이너리로의 이산화탄소 및 물 공급량; (5) 바이오리파이너리에서 바이오 디젤 생산량 및 수요 도시로의 디젤 공급량.

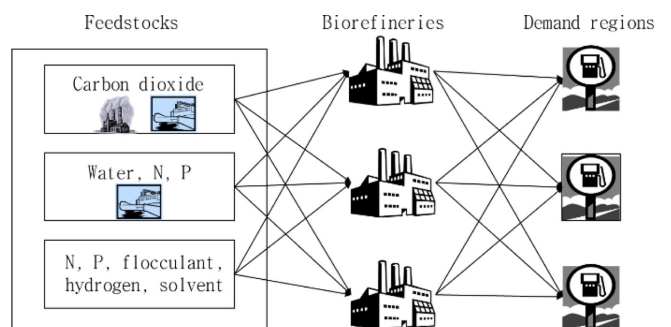


Fig. 1. Simplified diagram of biodiesel supply chain network.

3. 수학적 모델

제안된 BSCN 모델은 몇 가지 제약 조건과 목적 함수로 구성된다. 장기간의 운영에서 자원, 기술 및 제약 조건을 동시에 충족시키면서 원료 공급으로부터 최종 사용자에게 이르는 바이오 디젤 공급 네트워크의 전략적 설계를 위한 수학적 모델로 개발되었다. 이 모델은 바이오 매스에서 추출된 바이오 에탄올을 공급 네트워크의 mixed-integer linear programming (MILP) 모델[33]을 기반으로 미세조류를 이용한 바이오 디젤 공급 네트워크 모델을 도출한 연구[21]에서 도입하여 개발되었다. 이전 연구와 비교하여 이 논문에서 개발된 모델은 유사한 결정구조(MILP)를 따르지만 바이오 연료 생산에 필요한 미세조류를 재배하기 위하여 BSCN은 발전소에서 포집된 이산화탄소 및 WT 시스템에서 처리하는 물 공급이 필요하다. 그러므로 이 모델은 이산화탄소와 물의 운송 비용을 고려하고 나머지 5개의 공급 원료(즉, 질소, 인, 응집제, 수소, 부탄올 용매)는 외부업체로부터 구매하는 것으로 가정한다. 그리고 결정론적 모델과 함께 이산화탄소 공급량의 불확실성을 고려하기 위하여 2단계 확률론적 모델을 개발하였다.

3-1. 결정론적 모델

3-1-1. 목적 함수

제안된 모델의 목적은 전체 운영 기간 동안 자원, 기술 및 수요 제약을 충족시키면서 동시에 BSCN의 총 비용을 최소화 하는 것이다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_t \{ \sum_j \sum_{bpt} (f_{j,bpt}^F z_{j,bpt,t} + z_{j,bpt,t} LPR_j) + \\ & \sum_j \sum_{bpt} (f_{o_j,bpt}^F z_{j,bpt,t}) + \sum_i \sum_j \sum_{bpt} (mp_1 x_{1,i,j,bpt,t}) + TC^1 + TC^2 + \\ & TC^3 + \sum_m \alpha q_{m,t} - (\sum_j \sum_{bpt} np_{bpt} z_{j,bpt,t} mpn + \\ & \sum_j \sum_{bpt} z_{j,bpt,t} EB_{pe_{bpt}} + PGE MP_{EC}) \} \end{aligned} \quad (1)$$

where

$$TC_1 = \sum_t \sum_i \sum_l \sum_j \sum_{bpt} \sum_{cct} \sum_{cc} \sum_{cc} x_{p_{1,cct,cc,i,j,bpt,t}} Lcost_{cct,cc,i,j}$$

$$TC_2 = \sum_t \sum_i \sum_l \sum_j \sum_{bpt} \sum_{wp} x_{1,i,j,bpt,t} LHcost_{wp,i,j}$$

$$TC_3 = \sum_j \sum_m \sum_{bpt} \left(\frac{\left(\left(t_{lq}^d + \frac{t_{lq}^t}{v} \right) d_{jm} \right)}{cap_{lq}} + lu_{lq} \right) y_{i,m,bpt,t}$$

식 (1)에서 첫 번째, 두 번째 항은 각각 바이오리파이너리 시설의 건설 비용과 토지비용을 나타내며, 세 번째 항은 바이오리파이너리 운영 비용을 나타낸다. 네 번째 항은 이산화탄소와 물을 제외한 바이오리파이너리에 필요한 다섯 가지 원료 물질의 구매 비용을 의미한다. TC_1 , TC_2 및 TC_3 는 각각 이산화탄소, 물 및 생산된 바이오 디젤의 운송 비용을 나타낸다. 일곱 번째 항은 수요 도시 디젤 공급 부족에 대한 디젤 구매 비용이다. 여덟 번째 항과 아홉 번째 항은 바이오리파이너리에서 생산되는 부산물(나프타와 전기)의 판매 이익이며 마이너스 현금 흐름으로 간주되었다.

3-1-2. 제약 조건

3-1-2-1. 바이오리파이너리

특정 타입의 바이오리파이너리에서 생산되는 바이오 디젤의 총

생산량($pr_{j,bpt,t}$)은 리파이너리로 공급되는 이산화탄소량($x_{1,i,j,bpt,t}$)에 이산화탄소의 바이오 디젤 전환율(η)을 곱한 값과 같아야 한다:

$$\sum_i x_{1,i,j,bpt,t} \eta = pr_{j,bpt,t} \quad \forall j, bpt, t, l = CO_2 \quad (2)$$

바이오리파이너리부터 수요 도시까지 공급되는 바이오 디젤량($y_{j,m,bpt,t}$)은 바이오리파이너리에서 생산되는 바이오 디젤의 양($pr_{j,bpt,t}$)과 같아야 한다:

$$\sum_m y_{j,m,bpt,t} = pr_{j,bpt,t} \quad \forall j, bpt, t \quad (3)$$

바이오리파이너리에서 설정되는 바이오 디젤 생산용량($cap_{j,bpt,t}$)은 바이오리파이너리의 최대 용량($capr_{j,bpt}$)을 초과할 수 없다:

$$cap_{j,bpt,t} \leq cap_{j,bpt} z_{j,bpt,t} \quad \forall j, bpt, t \quad (4)$$

바이오리파이너리는 한번 설치되면 바이오 디젤 생산이 지속되어야 한다:

$$z_{j,bpt,t-1} \leq z_{j,bpt,t} \quad \forall j, bpt, t = 2, \dots, T \quad (5)$$

바이오리파이너리에서 생산되는 바이오 디젤량($pr_{j,bpt,t}$)은 리파이너리 설정 생산용량($cap_{j,bpt,t}$)을 초과할 수 없다:

$$pr_{j,bpt,t} \leq cap_{j,bpt,t} \quad \forall j, bpt, t \quad (6)$$

한번 건설된 바이오리파이너리의 용량은 줄어들 수 없다:

$$cap_{j,bpt,t-1} \leq cap_{j,bpt,t} \quad \forall j, bpt, t = 2, \dots, T \quad (7)$$

바이오리파이너리에 필요한 원료량($raw_{m_i,bpt}$)은 모든 원료 조달 지역에서 리파이너리로 공급되는 총량($x_{1,i,j,bpt,t}$)과 같다:

$$raw_{m_i,bpt} z_{j,bpt,t} = \sum_i x_{1,i,j,bpt,t} \quad \forall j, l, bpt, t \quad (8)$$

바이오리파이너리는 주어진 지역에서 제안적으로 건설된다; 바이오리파이너리 건설시 필요한 토지 면적(RLR)은 각 지역에서 주어진 사용 가능 토지 면적(ALS_j)보다 작아야 한다:

$$RLR z_{j,bpt,t} \leq ALS_j \quad \forall j, bpt, t \quad (9)$$

건설되는 바이오리파이너리의 수($z_{j,bpt,t}$)는 다음 식으로 계산할 수 있다:

$$z_{j,bpt,t} = z_{j,bpt,t} - z_{j,bpt,t-1} \quad \forall j, bpt, t = 2, \dots, t \quad (10)$$

$$z_{j,bpt,t} = z_{j,bpt,t} \quad \forall j, bpt, t = 1 \quad (11)$$

3-1-2-2. 수요 도시

수요 도시에서 필요한 디젤량($D_{m,t}$)은 바이오리파이너리에서 생산 후 공급하는 바이오 디젤량($y_{j,m,bpt,t}$)과 외부로부터 구매하는 디젤량($q_{m,t}$)의 합과 같아야 한다:

$$\sum_{j,bpt} y_{j,m,bpt,t} + q_{m,t} = D_{m,t} \quad \forall m, t \quad (12)$$

3-1-2-3. CCS 시스템

바이오리파이너리로 이산화탄소를 공급하기 위한 CCS 시스템은 화력발전소 근처에 건설되는 것으로 가정한다. 화력발전소의 위치

및 용량은 CCS 시스템뿐 아니라 바이오리파이너리의 위치 및 생산 용량에 영향을 준다. CCS 시스템의 설치 가능 용량($PLC_{i,pp,t}$)은 각 지역의 화력발전소의 최대 및 최소 용량 사이에서 결정된다:

$$zCO_{2,i,cct,cc,t} \min CCS_{cc} \leq \sum_{ppt} PLC_{i,pp,t} \leq zCO_{2,i,cct,cc,t} \max CCS_{cc} \quad \forall i, cct, cc, t \quad (13)$$

CCS 시스템의 설치 가능 수는 각 지역의 화력 발전소의 개수($NPP_{i,bpt}$)와 연관이 있다. CCS 시스템의 총 용량은 각 지역의 화력 발전소 총 용량을 초과할 수 없다:

$$\sum_{ppt} \sum_{cct} \sum_{cc} zCO_{2,i,cct,cc,t} \min CCS_{cc} NPP_{i,bpt} \leq \sum_{ppt} PLC_{i,pp,t} NPP_{i,bpt} \quad \forall i, t \quad (14)$$

바이오리파이너리로 공급되는 이산화탄소량($x_{i,j,bpt,t}$)은 특정 지역에서 CCS 시스템으로부터 포집되는 이산화탄소 최대 및 최소량 사이에서 공급된다:

$$\sum_{cct} \sum_{cc} zCO_{2,i,cct,cc,t} \min CCS_{cc} CO_{2,para} \leq \sum_j \sum_{ppt} x_{i,j,bpt,t} \leq \sum_{cct} \sum_{cc} zCO_{2,i,cct,cc,t} \max CCS_{cc} CO_{2,para} \quad \forall i, t, l = CO_2 \quad (15)$$

오직 한 가지 용량을 갖는 CCS 시스템이 특정 지역에 건설 될 수 있다:

$$\sum_{cc} zCO_{2,i,cct,cc,t} \leq 1 \quad \forall i, cct, t \quad (16)$$

CCS 시스템으로부터 포집 후 공급되는 이산화탄소량($x_{p,cct,cc,i,j,bpt,t}$)은 바이오리파이너리로 공급되는 이산화탄소량($x_{i,j,bpt,t}$)과 같아야 한다:

$$x_{i,j,bpt,t} = \sum_{cct} \sum_{cc} x_{p,cct,cc,i,j,bpt,t} \quad \forall cct, cc, i, j, bpt, t, l = CO_2 \quad (17)$$

3-1-2-4. 이산화탄소 및 물 공급을 위한 파이프라인

본 연구에서는 바이오 디젤 생산에 필요한 바이오리파이너리로 이산화탄소와 물을 파이프라인을 이용하여 바이오리파이너리에 공급한다. 두 가지 원료 공급은 영역 간 운송 거리 및 수량에 따라 변경이 될 수 있으며 이는 변수이므로 목적 함수에서 비선형 방정식의 조합으로 이어짐을 의미한다. 예를 들어, 바이오리파이너리로의 이산화탄소 공급을 위하여 CCS 설치 용량, 이산화탄소 공급량, 파이프라인 설치 용량 등이 결정되어야 하는데, 3가지 모두 변수로 설정하는 경우 비선형 방정식이 만들어 진다(예, TC_1). 설정된 변수에 의하여 도출된 최적 결과 값은 제약 조건이 비선형으로 구성되어 있기 때문에 제약 조건의 범위 설정에 따라 도출된 최적 값이 global optimum이 아닌 local optimum이 될 가능성이 존재한다. 이를 해결하기 위해 이산화탄소 운송 비용(TC_1)에서 사용하는 변수인 연간 이산화탄소 비용($Lcost_{cct,cc,i,j}$)을 선형화하여 사용한다. Ccs 시스템의 설치 가능 용량 레벨 중 3가지 타입(small, medium, large)의 용량을 설정하고, 화력발전소와 바이오리파이너리 사이의 주어진 거리를 이용하여 가능한 모든 변수를 계수화한다. 이와 같이 변수를 계수로 변경하여 비선형 방정식을 선형 방정식으로 결과를 도출하는 경우 global optimum을 보장할 수 있다. 따라서 이 연구에서 사용하는 함수는 문제 전반에 걸쳐 선형화가 가능하므로 기존연구[21]에서 적용한 것과 같은 방식으로 이산화탄소 및 물 공급 비용을 선형화하여

사용한다. 이산화탄소 공급 비용에는 이산화탄소 포집을 위한 CCS 시스템과 이산화탄소 공급에 필요한 파이프 라인의 자본 및 운영 비용이 포함된다. 발전소 용량을 기준으로 다양한 유형의 이산화탄소를 포집하기 위하여 CCS 시스템의 연간 자본 비용을 계산한다.

이산화탄소를 공급하는 CCS 시스템의 연간 자본 비용($Lcost_{cct,cc,i,j}$)은 건설 비용($ACC_{cct,cc,i,j}$)과 운영비용($OC_{cct,cc,i,j}$)을 이산화탄소 포집량($CO_{2,cct,cc}^{pt}$)으로 나누어 결정한다:

$$Lcost_{cct,cc,i,j} = \frac{ACC_{cct,cc,i,j} + OC_{cct,cc,i,j}}{CO_{2,cct,cc}^{pt}} \quad \forall cct, cc, i, j \quad (18)$$

건설비용($ACC_{cct,cc,i,j}$)은 이산화탄소를 포집하는 CCS 시스템($ACC_{cap,cct,cc}$)과 이산화탄소 공급을 위한 파이프라인 건설에 필요한 비용($ACC_{pump,cct,cc,i,j}$)을 포함한다:

$$ACC_{cct,cc,i,j} = ACC_{cap,cct,cc} + ACC_{pump,cct,cc,i,j} \quad \forall cct, cc, i, j \quad (19)$$

이산화탄소 포집을 위한 CCS 시스템의 건설비용 ($ACC_{cap,cct,cc}$)은 6/10 인자법칙을 이용하여 72MW 화력발전소의 건설비용($cCO_{2,cct,cc}$)으로부터 결정한다:

$$ACC_{cap,cct,cc} = cCO_{2,cct,cc} \left(\frac{CCS_{capa}}{72} \right)^{0.6} \quad \forall cct, cc \quad (20)$$

이산화탄소 공급을 위한 파이프라인의 건설비용($ACC_{pump,cct,cc,i,j}$)은 CCS 시스템과 바이오리파이너리간의 거리($d_{i,j}$)를 고려한 함수[21]로부터 결정한다:

$$ACC_{pump,cct,cc,i,j} = fCO_{2,cct,cc} + gCO_{2,cct,cc} d_{i,j} \quad \forall cct, cc, i, j \quad (21)$$

운영비용($OC_{cct,cc,i,j}$)은 이산화탄소를 포집하는 CCS 시스템($OC_{cap,cct,cc}$)과 이산화탄소 공급을 위한 파이프라인 운영에 필요한 비용($OC_{pump,cct,cc,i,j}$)을 포함한다:

$$OC_{cct,cc,i,j} = OC_{cap,cct,cc} + OC_{pump,cct,cc,i,j} \quad \forall cct, cc, i, j \quad (22)$$

이산화탄소 포집을 위한 CCS 시스템의 운영비용($OC_{cap,cct,cc}$)은 이산화탄소 포집량($CO_{2,cct,cc}^{pt}$)을 고려한 함수[21]를 이용하여 결정한다:

$$OC_{cap,cct,cc} = dCO_{2,cct,cc} CO_{2,cct,cc}^{pt} \quad \forall cct, cc \quad (23)$$

이산화탄소 공급을 위한 파이프라인의 운영비용($OC_{pump,cct,cc,i,j}$)은 건설비용과 비슷하게 CCS 시스템과 바이오리파이너리간의 거리($d_{i,j}$)를 고려한 함수[21]로부터 결정한다:

$$OC_{pump,cct,cc,i,j} = hCO_{2,cct,cc} + iCO_{2,cct,cc} d_{i,j} \quad \forall cct, cc, i, j \quad (24)$$

WT 시스템으로부터 바이오리파이너리로 물을 공급하는 파이프라인의 연간 자본 비용($LHcost_{wp,i,j}$)은 파이프라인 운영비용($HOC_{wp,i,j}$)을 물 공급량($water_{p,wp}$)으로 나눈 값과 파이프라인 건설 비용($HACC_{wp,i,j}$)을 더하여 결정한다:

$$LHcost_{wp,i,j} = HACC_{pump,wp,i,j} + \frac{HOC_{pump,wp,i,j}}{water_{p,wp}} \quad \forall wp, i, j \quad (25)$$

물 공급을 위한 파이프라인의 건설비용($HACC_{wp,i,j}$)은 WT 시스템에서 바이오리파이너리까지의 거리($d_{i,j}$)를 고려한 함수[21]로부터

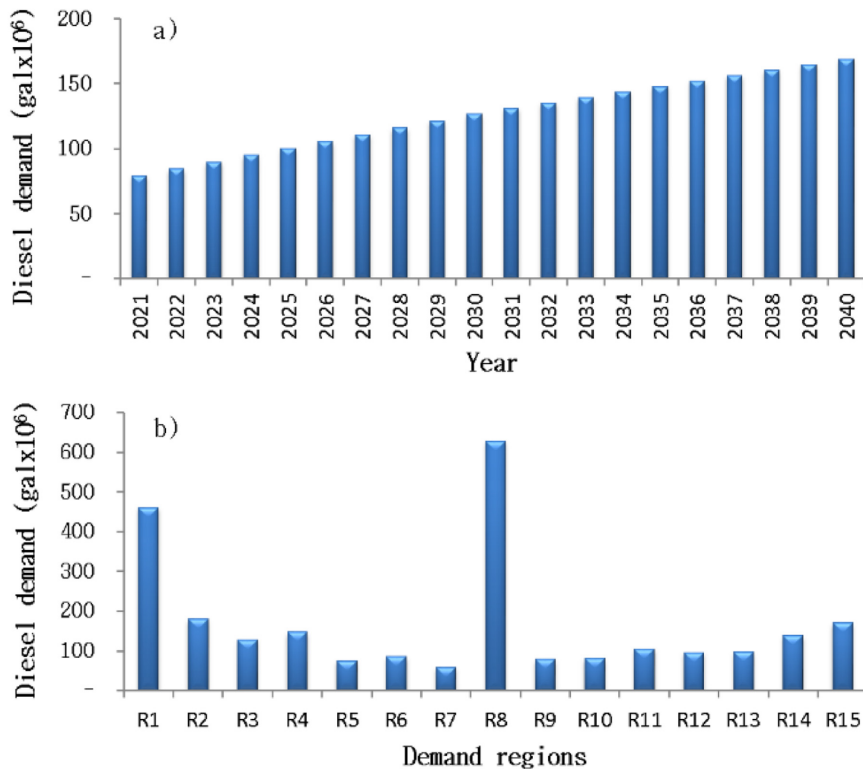


Fig. 3. (a-b) Diesel demand in (a) Korea (b) each region.

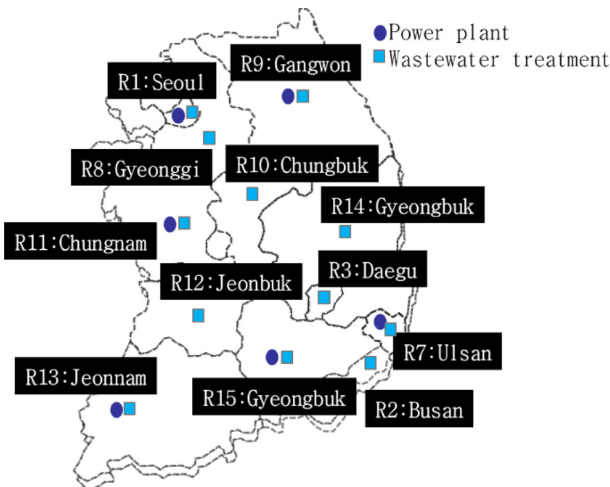


Fig. 4. Regions of power plants and wastewater treatment in Korea.

CCS 및 WT 시스템을 이용하여 공급할 수 있으며 다른 공급 원료와 같이 구입 또한 가능하다. 이산화탄소와 물을 공급하기 위한 화력발전소(CCS 시스템)와 WT 시스템은 한국 전역에 분포하고 있다 (Fig. 4).

화력발전소는 6개 지역(지역 1, 7, 9, 11, 13 및 15)에 위치하고 WT 시스템은 12개 지역(지역 4, 5 및 6을 제외한 나머지 지역)에 위치하고 있다. 이산화탄소는 화력발전소 배출가스에서 포집하며 지역 내 또는 다른 지역의 바이오리파이너리로 보내진다. WT 시스템에서 처리되는 물 또한 바이오 디젤 생산을 위해 바이오리파이너리로 보내진다. 화력발전소와 WT 시스템의 용량과 개수는 지역마다 다르며, 인구 밀집도가 높은 지역 1은 다른 지역보다 WT 시스템의

용량이 높은 특징을 가지고 있다.

4-2. 잠재적인 바이오리파이너리 위치 및 바이오 디젤생산량

이 연구에서 바이오리파이너리 건설이 가능한 지역으로 해안 지역을 제외하고 대한민국의 15개 내륙 지역을 고려한다. 바이오리파이너리의 위치는 CCS 시스템 및 WT 시스템과 바이오리파이너리 건설을 위한 토지 비용 및 사용 가능 토지 면적과 거리를 고려하여 선택될 수 있다. 토지비용과 사용 가능 토지 면적은 지역마다 다르므로 동일한 바이오리파이너리 용량의 자본 비용도 지역마다 다를 수 있다. 이 사례 연구에서 리파이너리의 최대 생산 능력은 기존 연구의 결과로부터 연간 7.3 MM 갤런으로 설정한다[18].

4-3. 운송 용량 및 운송 비용

원료 물질을 바이오리파이너리로 공급하는 운송비용과 생산된 바이오 디젤을 수요 도시로 공급하는 운송비용을 고려해야 한다. 파이프 라인의 최대 운송 능력은 연간 139.6 Mt 이며, 트럭의 최대 운송 능력은 액체 제품의 경우 트럭 한대 당 8,000 갤런이며 평균 속도는 시단당 40마일이다. 생산된 바이오 디젤이 수요 도시로 공급될 때 운송 비용에는 적체 비용, 하역 비용, 시간(인건비, 트럭 자본 비용 포함) 및 거리(연료, 보험, 유지 보수 비용 포함)에 따른 운전 비용이 포함된다. 지역 간 운송 거리와 모든 지역의 토지 비용은 수소 공급 네트워크에 대한 연구[39]에서 사용한 데이터를 이용한다.

5. 결과 및 고찰

제안된 모델은 3.40 GHz에서 작동하는 Intel® Core™ i5-7200U CPU@2.50GHz Ram 16GB가 장착된 컴퓨터에서 상용 솔버(CPLEX)

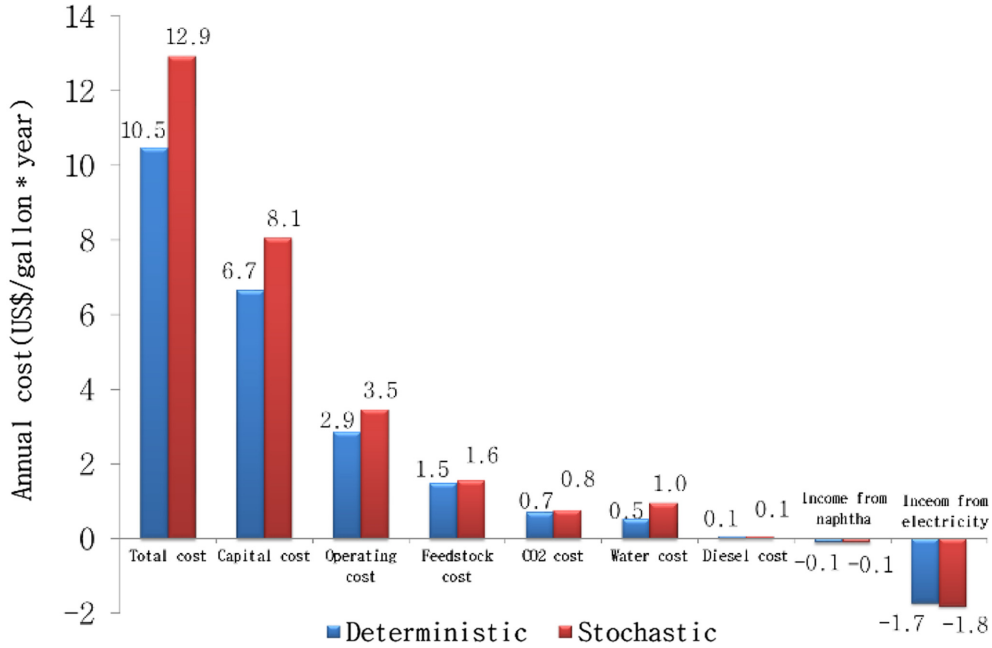


Fig. 5. Comparison of optimal cost in biodiesel supply chain network.

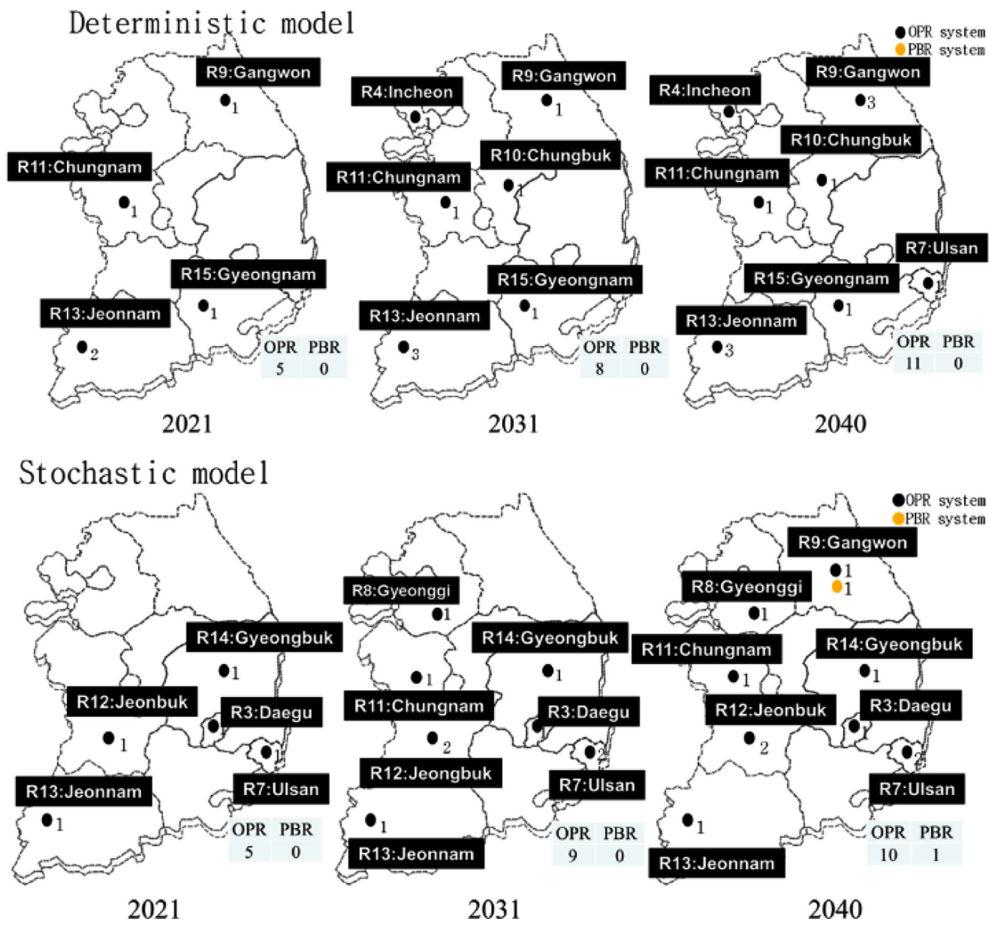


Fig. 6. Optimal locations and numbers of biorefineries.

가 있는 GAMS 프로그램을 사용하여 해결되었다. 이 장에서는 결정론적 모델과 확률론적 모델 구조 간 BSCN의 최적 비용 및 최적 설계 결과를 제시한다.

5-1. 최적 비용

최적의 바이오 디젤 네트워크 비용은 바이오피라이너리 자본 비용 및 운영 비용, 원료 구매 비용, 이산화탄소 포집 및 공급 비용, 물

공급 비용, 바이오 디젤 운송 비용, 나프타 판매 이득 및 전기 판매 이득으로 구성되어 있다. 바이오리파이너리 자본 비용에는 건설 비용과 토지 비용이 포함되어 있다.

이산화탄소 공급량의 불확실성을 고려한 확률론적 모델의 최적 비용(갤런 당 12.9 미국 달러)은 결정론적 모델의 최적 비용(갤런 당 10.5 미국 달러) 보다 약 23% 높은 결과를 보인다. 두 가지 모델의 총 비용 구성에서 바이오리파이너리 자본 비용(63.5% 및 62.3%)이 가장 큰 비용 요소이며, 두 번째 비용 요소는 바이오리파이너리 운영 비용(27.3% 및 26.7%)이다. 이산화탄소, 물 및 바이오 디젤을 공급하는 비용은 위의 두 가지 비용 요소에 비하여 작은 값을 가지는 것을 확인하였다.

5-2. 최적 디자인

바이오 디젤을 생산하기 위한 바이오리파이너리의 최적 디자인은 2021년부터 2040년까지 증가하는 바이오 디젤의 수요량에 따라 증가하는 경향을 보인다. 결정론적 모델과 확률론적 모델에 대해서 2021년, 2031년, 및 2040년으로 나누어 살펴보았을 때 설치되는 바이오리파이너리의 개수 및 위치는 각각 다르다(Fig. 6). 두 모델간 최적 바이오 리파이너리 설치 개수는 2040년에 총 11기로 같고 건설비가 저렴한 OPR 유형의 바이오리파이너리가 주로 설치되었지만 확률론적 모델에서 PBR 시스템이 한 기 건설 되었음을 확인하였다. 이는 토지 비용이 가장 저렴한 지역 9에 PBR 시스템을 설치함으로써 원활한 바이오 디젤 생산이 가능하도록 하였다. 결정론적 모델에서 바이오 디젤 생산을 위해서 전국적으로 바이오리파이너리가 설치되는 것을 확인할 수 있지만, 확률론적 모델에서는 불확실한 이산화탄소 공급을 고려하여 이산화탄소 공급이 원활하고 토지 비용이 상대적으로 저렴한 지역에 설치되었음을 확인하였다.

5-3. 원료 및 바이오 디젤 공급

바이오 디젤 생산을 위한 원료 공급과 생산된 바이오 디젤 운송 최적 전략은 이산화탄소, 물 및 바이오 디젤 공급 비용 및 가용성 등 여러 요인에 의해 영향을 받았다. 대표적으로, 지역 9에 설치된 바이오

리파이너리로 이산화탄소 공급을 위한 CCS 시스템은 화력발전소가 있는 여러 지역에 설치가 됨을 확인하였다(Fig. 7).

Fig. 7에서 결정론적 모델의 결과는 지역 9에 설치된 3기의 바이오리파이너리에 이산화탄소를 공급하기 위하여 4개의 지역(지역 1, 9, 11, 13)에 CCS 시스템을 설치하였고, 가장 가까운 지역 9에 설치된 CCS 시스템에서 필요한 이산화탄소 대부분(약 60%)을 공급한다. 확률론적 모델의 결과는 지역 9에 1기의 OPR 시스템과 1기의 PBR 시스템이 설치되었고 대부분의 이산화탄소는 지역 11에 설치된 큰 용량을 갖는 CCS 시스템에서 약 86%의 이산화탄소를 공급한다.

이산화탄소 공급과는 다르게 물 공급은 대한민국에 이미 설치되어 운영하고 있는 하수처리장(WT 시스템)을 이용하였고 최적 물 공급 전략을 도출하였다(Fig. 8). 두 모델의 결과는 각 지역에 설치된 바이오리파이너리에 물을 공급하기 위해서 바이오리파이너리가 설치된 지역이나 혹은 근접 지역에서 대부분의 수요량을 충족시키는 결과를 보여준다.

마지막으로, 바이오리파이너리에서 생산된 바이오 디젤을 최적으로 디젤 수요도시까지 공급하는 것이 필요하다. 디젤 수요를 충족하기 위해서 바이오리파이너리가 설치된 지역으로부터 수요도시(지역 7)까지 최적의 공급 전략을 도출하였다(Fig. 9).

결정론적 모델에서 지역 7의 디젤 수요량(3,100만 갤런)을 충족시키기 위해서 6개 지역(4: 200만 갤런; 7: 800만 갤런; 9: 700만 갤런; 11: 200만 갤런; 13: 700만 갤런; 15: 500만 갤런)에서 디젤이 공급되며, 같은 지역의 바이오리파이너리에서 수요량의 약 26%를 공급한다. 확률론적 모델에서는 지역 7의 디젤 수요량을 충족시키기 위해서 결정론적 모델과 같이 6개 지역(3: 1,300만 갤런; 7: 500만 갤런; 9: 100만 갤런; 11: 200만 갤런; 13: 300만 갤런; 14: 700만 갤런)에서 디젤이 공급되지만, 결정론적 모델의 결과와는 다르게 같은 지역내의 바이오리파이너리가 아닌 근접 지역(지역 3)에서 가장 많은 디젤(약 42%)을 공급하는 결과를 보인다.

본 연구에서는 미세조류를 기반으로 하는 바이오 디젤을 생산 및 공급하는 바이오디젤 공급 네트워크를 구축하고 바이오 디젤 생산에 중요한 원료인 이산화탄소의 공급량 불확실성을 고려하여 최적

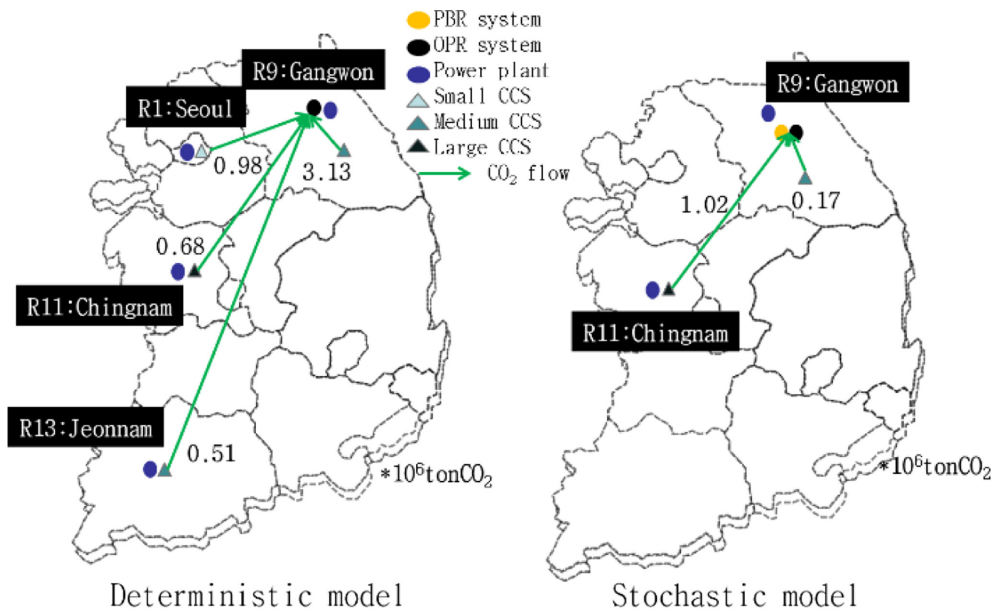


Fig. 7. Optimal amounts and locations of supplied carbon dioxide (total amounts of carbon dioxide from 2021 to 2040).

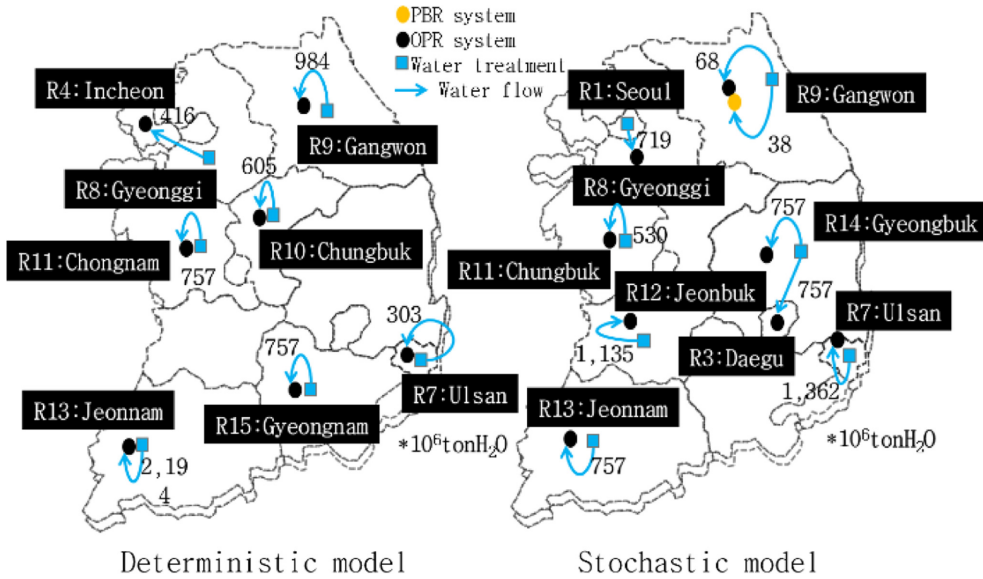


Fig. 8. Optimal amounts and locations of supplied water (total amounts of water from 2021 to 2040).

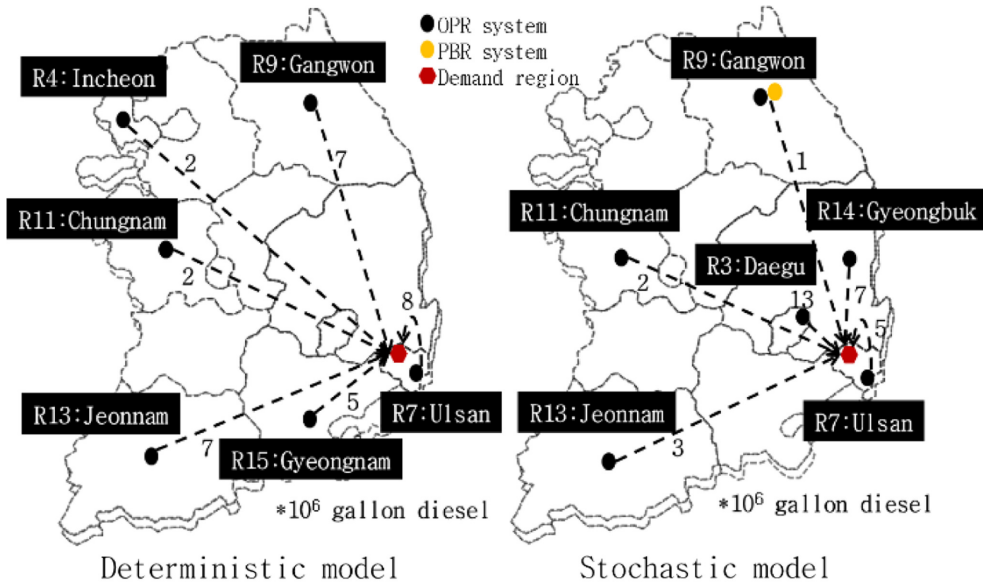


Fig. 9. Optimal amounts and locations of supplied biodiesel in region 7 (total amounts of biodiesel from 2021 to 2040).

의 바이오 디젤 공급 네트워크 전략을 도출하였다. 이산화탄소 공급량의 불확실성은 바이오 디젤 공급 네트워크의 설계에 변화를 발생시켰으며, 이산화탄소의 원활한 공급을 위하여 CCS 시스템과 가까운 지역에 바이오리파이너리가 설치됨을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구는 미세조류 기반으로 바이오 디젤을 생산 및 공급하는 BSCN의 동적 시스템 변화를 고려한 에너지 시스템 최적화 전략을 도출한 새로운 접근 방식의 연구이다. 바이오 디젤 공급 네트워크를 관리하기 위한 바이오 디젤 생산 전략의 다중 기간 모델은 이산화탄소 공급량의 불확실성을 고려하여 가장 효과적인 시스템 구성을 결정하였다. 이산화탄소 공급의 불확실성을 고려한 확률론적 모델은 결정론적 모델보다 바이오 디젤 공급 네트워크 비용이 약 23% 증가하는 결과를 보인다. 본 연구의 요점은 미래 에너지 공급 개선에 관

한 새로운 에너지 생산 및 공급 네트워크를 구성한 것이다. 이산화탄소 원료 공급은 바이오 디젤 생산을 위한 바이오리파이너리의 건설 위치를 결정하는 주요 요인으로 판명되었다.

본 연구는 에너지와 식량 공급 간의 경쟁을 제거하고 바이오 디젤 생산을 위한 바이오리파이너리 건설 위치를 최적화 함으로써 화석 연료 기반 디젤을 대체할 수 있는 수학적 모델을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 방법은 다양한 모델의 바이오 매스를 이용한 바이오 연료 및 화학 제품을 생산하는 공정에 대한 공급 네트워크 최적화를 유도하는 데 사용할 수 있다.

Nomenclature

Sets	
bpt	: Type of biorefinery
cc	: Capacity of CCS system
cct	: Type of CCS system

i	: Location of feedstock supply
j	: Location of biorefinery
l	: Type of feedstock
m	: Diesel demand region
t	: Year
wp	: Type of wastewater treatment
z	: Scenario

Parameters

α	: Purchase cost of biodiesel
$ACC_{cct,cc,ij}$: Annual capital cost of CCS system and pipeline
$ACC_{cap_{cct,cc}}$: Annual capital cost of CCS system
$ACC_{pump_{cct,cc,ij}}$: Annual capital cost of pipeline for CO ₂ transportation
ALS_j	: Available land size
cap_k	: Capacity of truck transportation
$cCO_2_{cct,cc}$: Parameter of CCS system
CCS_{capa}	: Parameter of CO ₂ capture capacity
CO_2^{papa}	: Parameter of CO ₂ capture
$CO_2^{pt}_{cct,cc}$: Amount of capture CO ₂
d_{jm}	: Distance from biorefinery to demand region
$d_{i,j}$: Distance from feedstock location to biorefinery
$D_{m,t}$: Biodiesel demand
$dCO_2_{cct,cc}$: Parameter of CCS system and pipeline
$EB_{per_{bpt}}$: Energy balance of electricity
$f_{i,j}^F$: Annual capital cost of pipeline
$fCO_2_{cct,cc}$: Parameter of CCS system and pipeline
fH_2O_{wp}	: Parameter of WT system and pipeline
$f_{i,j}^F$: Annual operating cost of biorefinery
$gCO_2_{cct,cc}$: Parameter of CCS system and pipeline
gH_2O_{wp}	: Parameter of WT system and pipeline
$HACC_{pump_{wp,ij}}$: Annual capital cost of pipeline for water transportation
$hCO_2_{cct,cc}$: Parameter of CCS system and pipeline
hH_2O_{wp}	: Parameter of WT system and pipeline
$HOC_{pump_{wp,ij}}$: Annual operating cost of pipeline for water transportation
$iCO_2_{cct,cc}$: Parameter of CCS system and pipeline
iH_2O_{wp}	: Parameter of WT system and pipeline
$Lcost_{cct,cc,ij}$: Annual transportation cost of carbon dioxide
$LHcost_{wp,ij}$: Annual transportation cost of water
LPR_j	: Land price of biorefinery construction
lu_{lq}	: Loading cost of truck
$maxCCS_{cc}$: Maximum capacity of CCS system
$minCCS_{cc}$: Minimum capacity of CCS system
mp_1	: Purchase cost of feedstock
MP_{EC}	: Selling price of electricity
mpn	: Selling price of naphtha
np_{bpt}	: Amount of produced naphtha
$NPP_{i,ppt}$: Number of power plant
$OC_{cct,cc,ij}$: Annual operating cost of CCS system and pipeline
$OC_{cap_{cct,cc}}$: Annual operating cost of CCS system
$OC_{pump_{cct,cc,ij}}$: Annual operating cost of pipeline for carbon dioxide transportation
PGE	: Efficiency of electricity generation
$PLC_{i,ppt}$: Capacity of power plant
$raw_{m_1,bpt}$: Feedstock requirement
RLR	: Required land of biorefinery construction
t_{lq}^d	: Distance-based transportation cost
t_{lq}^t	: Time-based transportation cost
η	: Conversion ratio of biodiesel

v	: Average truck speed
$water_{p_{wp}}$: Amount of treated water

Integer variables

$Z_{j,bpt,t}$: Number of biorefinery operated in each year
$zCO_2_{i,cct,cc,t}$: Number of CCS system constructed in each year
$ZP_{j,bpt,t}$: Number of biorefinery constructed in each year

Continuous variables

$cap_{j,bpt,t}$: Designed capacity of biorefinery
$capr_{j,bpt}$: Maximum capacity of biorefinery
$pr_{j,bpt,t}$: Amount of produced biodiesel
$q_{m,t}$: Purchase cost of diesel from the market
TC^1	: Transportation cost of carbon dioxide from CCS systems
TC^2	: Transportation cost of water from wastewater treatment systems
TC^3	: Transportation cost of biodiesel from biorefineries
$X_{l,i,j,bpt,t}$: Amount of supplied feedstock
$xP_{l,cct,cc,i,j,bpt,t}$: Amount of carbon supplied dioxide from CCS system
$Y_{l,m,bpt,t}$: Amount of biodiesel supplied from biorefineries to demand regions

References

- Holloway, S., "Underground Sequestration of Carbon Dioxide— a Viable Greenhouse Gas Mitigation Option," *Energy*, **30**(11-12), 2318-2333(2005).
- Sims, R. E., "Renewable Energy: a Response to Climate Change," *Sol. Energy*, **76**(1-3), 9-17(2004).
- 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).
- de Gorter, H. and Y. Tsur, "Cost-benefit Tests for GHG Emissions from Biofuel Production," *Eur. Rev. Agric. Econ.*, **37**(2), 133-145 (2010).
- Kauffman, N., Hayes, D. and Brown, R., "A Life Cycle Assessment of Advanced Biofuel Production from a Hectare of Corn," *Fuel*, **90**(11), 3306-3314(2011).
- Zabaniotou, A. and Andreou, K., "Development of Alternative Energy Sources for GHG Emissions Reduction in the Textile Industry by Energy Recovery from Cotton Ginning Waste," *J. Clean Prod.*, **18**(8), 784-790(2010).
- Chakraborty, S., Aggarwal, V., Mukherjee, D. and Andras, K., "Biomass to Biofuel: a Review on Production Technology," *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, **7**, S254-S262(2012).
- Ho, D. P., Ngo, H. H. and Guo, W., "A Mini Review on Renewable Sources for Biofuel," *Bioresour. Technol.*, **169**, 742-749(2014).
- Vassilev, S.V. and Vassileva, C. G., "Composition, Properties and Challenges of Algae Biomass for Biofuel Application: An Overview," *Fuel*, **181**, 1-33(2016).
- Alam, F., Mobin, S. and Chowdhury, H., "Third Generation Biofuel from Algae," *Procedia Eng.*, **105**, 763-768(2015).
- Alam, M. A., Wang, Z. and Yuan, Z., "Generation and Harvesting of Microalgae Biomass for Biofuel Production, in Prospects and Challenges in Algal Biotechnology," 2017, Springer. p. 89-111.
- Shemfe, M. B., Gu, S. and Ranganathan, P., "Techno-economic Performance Analysis of Biofuel Production and Miniature Electric Power Generation from Biomass Fast Pyrolysis and Bio-oil Upgrading," *Fuel*, **143**, 361-372(2015).

13. Anex, R. P., Aden, A., Kazi, F. K., Fortman, J., Swanson, R. M., Wright, M. M., Satrio, J. A., Brown, R. C., Dugaard, D. E., Platon, A. and Kothandaraman, G., "Techno-economic Comparison of Biomass-to-transportation Fuels Via Pyrolysis, Gasification, and Biochemical Pathways," *Fuel*, **89**, S29-S35(2010).
14. Han, J., Luterbacher, J.S., Alonso, D.M., Dumesic, J.A. and Maravelias, C.T., "A lignoCellulosic Ethanol Strategy via Non-enzymatic Sugar Production: Process Synthesis and Analysis," *Bioresour. Technol.*, **182**, 258-266(2015).
15. Han, J., Sen, S. M., Luterbacher, J. S., Alonso, D. M., Dumesic, J. A. and Maravelias, C. T., "Process Systems Engineering Studies for the Synthesis of Catalytic Biomass-to-fuels Strategies," *Comput. Chem. Eng.*, **81**, 57-69(2015).
16. Byun, J. and Han, J., "Catalytic Production of Biofuels (butene oligomers) and Biochemicals (tetrahydrofurfuryl alcohol) from Corn Stover," *Bioresour. Technol.*, **211**, 360-366(2016).
17. Byun, J. and Han, J., "An Integrated Strategy for Catalytic Co-Production of Jet Fuel Range Alkenes, Tetrahydrofurfuryl Alcohol, and 1, 2-pentanediol from Lignocellulosic Biomass," *Green Chem.*, **19**(21), 5214-5229(2017).
18. Davis, R., Aden, A. and Pienkos, P. T., "Techno-economic Analysis of Autotrophic Microalgae for Fuel Production," *Appl. Energy*, **88**(10), 3524-3531(2011).
19. Byun, J., Ahn, Y., Kim, J., Kim, J. R., Jeong, S. Y., Kim, B. S., Kim, H. J. and Han, J., "Integrated Process for Electrocatalytic Conversion of Glycerol to Chemicals and Catalytic Conversion of Corn Stover to Fuels," *Energy Conv. Manag.*, **163**, 180-186(2018).
20. An, H., Wilhelm, W. E. and Searcy, S. W., "Biofuel and Petroleum-based Fuel Supply Chain Research: a Literature Review," *Biomass Bioenerg.*, **35**(9), 3763-3774(2011).
21. Ahn, Y. C., Lee, I. B., Lee, K. H. and Han, J. H., "Strategic Planning Design of Microalgae Biomass-to-biodiesel Supply Chain Network: Multi-period Deterministic Model," *Appl. Energy*, **154**, 528-542(2015).
22. Delrue, F., Li-Beisson, Y., Setier, P. A., Sahut, C., Roubaud, A., Froment, A. K. and Peltier, G., "Comparison of Various Microalgae Liquid Biofuel Production Pathways Based on Energetic, Economic and Environmental Criteria," *Bioresour. Technol.*, **136**, 205-212(2013).
23. Batan, L. Y., Graff, G. D. and Bradley, T. H., "Techno-economic and Monte Carlo Probabilistic Analysis of Microalgae Biofuel Production System," *Bioresour. Technol.*, **219**, 45-52(2016).
24. Thilakaratne, R., Wright, M. M. and Brown, R. C., "A Techno-economic Analysis of Microalgae Remnant Catalytic Pyrolysis and Upgrading to Fuels," *Fuel*, **128**, 104-112(2014).
25. Dutta, S., Neto, F. and Coelho, M. C., "Microalgae Biofuels: A Comparative Study on Techno-economic Analysis & Life-cycle Assessment," *Algal Res.*, **20**, 44-52(2016).
26. Xin, C., Addy, M. M., Zhao, J., Cheng, Y., Cheng, S., Mu, D., Liu, Y., Ding, R., Chen, P. and Ruan, R., "Comprehensive Techno-economic Analysis of Wastewater-based Algal Biofuel Production: a Case Study," *Bioresour. Technol.*, **211**, 584-593(2016).
27. Ou, L., Thilakaratne, R., Brown, R. C. and Wright, M. M., "Techno-economic Analysis of Transportation Fuels from Defatted Microalgae via Hydrothermal Liquefaction and Hydroprocessing," *Biomass Bioenerg.*, **72**, 45-54(2015).
28. 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).
29. Vuarnoz, D., Kitanovski, A., Gonin, C., Borgeaud, Y., Delessert, M., Meinen, M. and Egolf, P. W., "Quantitative Feasibility Study of Magnetocaloric Energy Conversion Utilizing Industrial Waste Heat," *Appl. Energy*, **100**, 229-237(2012).
30. Rudberg, M., Waldemarsson, M. and Lidestam, H., "Strategic Perspectives on Energy Management: A Case Study in the Process Industry," *Appl. Energy*, **104**, 487-496(2013).
31. Han, J.-H., Ahn, Y.-C. and Lee, I.-B., "A Multi-objective Optimization Model for Sustainable Electricity Generation and CO₂ Mitigation (EGCM) Infrastructure Design Considering Economic Profit and Financial Risk," *Appl. Energy*, **95**, 186-195(2012).
32. Han, J.-H. and Lee, I.-B., "A Systematic Process Integration Framework for the Optimal Design and Techno-economic Performance Analysis of Energy Supply and CO₂ Mitigation Strategies," *Appl. Energy*, **125**, 136-146(2014).
33. Huang, Y., Chen, C.-W. and Fan, Y., "Multistage Optimization of the Supply Chains of Biofuels," *Transp. Res. Pt. e-Logist. Transp. Rev.*, **46**(6), 820-830(2010).
34. Sharifzadeh, M., Garcia, M. C. and Shah, N., "Supply Chain Network Design and Operation: Systematic Decision-making for Centralized, Distributed, and Mobile Biofuel Production Using Mixed Integer Linear Programming (MILP) Under Uncertainty," *Biomass Bioenerg.*, **81**, 401-414(2015).
35. Lim, M. K. and Ouyang, Y., "Biofuel Supply Chain Network Design and Operations, in Environmentally Responsible Supply Chains," Springer. p. 143-162(2016).
36. Kim, J., Realff, M. J., Lee, J. H., Whittaker, C. and Furtner, L., "Design of Biomass Processing Network for Biofuel Production Using an MILP Model," *Biomass Bioenerg.*, **35**(2), 853-871(2011).
37. Yu, J., Lee, I. B., Han, J. and Ahn, Y., "Stochastic Approach to Optimize the Supply Chain Network of Microalga-Derived Biodiesel under Uncertain Diesel Demand," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **53**(1), 24-35(2020).
38. Kim, J., Johnson, T. A., Miller, J. E., Stechel, E. B. and Maravelias, C. T., "Fuel Production from CO₂ Using Solar-thermal Energy: System Level Analysis," *Energy Environ. Sci.*, **5**(9), 8417-8429(2012).
39. Kim, J., Lee, Y. and Moon, I., "Optimization of a Hydrogen Supply Chain Under Demand Uncertainty," *Int. J. Hydrog. Energy*, **33**(18), 4715-4729(2008).