



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2019년04월09일
(11) 등록번호 10-1937160
(24) 등록일자 2019년01월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C02F 11/04 (2006.01) C02F 3/28 (2006.01)
(52) CPC특허분류
C02F 11/04 (2013.01)
C02F 3/2893 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0025637
(22) 출원일자 2018년03월05일
심사청구일자 2018년03월05일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020110117809 A
KR101308405 B1
KR101706078 B1
Soonho Hwangbo, In-Beum Lee, and Jeehoon Han.
"Mathematical model to optimize design of
integrated utility supply network and future
global hydrogen supply network under demand
uncertainty." Applied En

(73) 특허권자
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경
희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
유창규
경기도 수원시 영통구 웰빙타운로 20, 8308동 20
2호(이의동, 호반가든하임)
황보순호
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 경희대 국제
캠퍼스 공과대학(서천동)
(74) 대리인
특허법인도담

전체 청구항 수 : 총 5 항

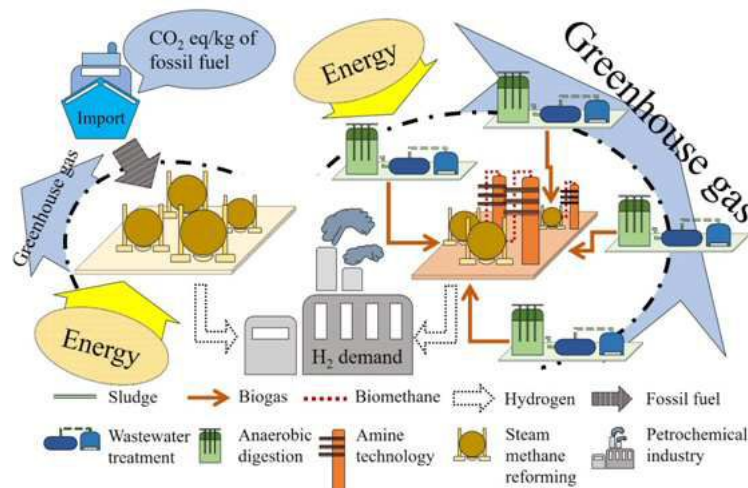
심사관 : 박재우

(54) 발명의 명칭 폐수처리 플랜트로부터 배출된 바이오가스를 이용한 통합 수소 공급 망의 실시 방법

(57) 요약

본 개시 내용에서는 기존의 수소 공급 망으로서 천연가스 수소 공급 망(NGHSN)에 생물학적 수소 공급 망으로서 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망(S2BHSN)을 통합한 수소 공급 망에 있어서, 수학적 모델을 통하여 도출된 결과를 기초로 하고, 수소 수요량의 불확실성 하에서 환경 요소 및 비용 요소 간 관계에 기반하여 최종의 사결정자가 선택할 수 있는 통합 수소 공급 망의 실시(또는 설계) 방법이 기재된다.

대표도 - 도1



명세서

청구범위

청구항 1

천연가스 수소 공급 망에,

- 유입 폐수를 처리하고, 이로부터 전환된 슬러지를 형성하는 폐수 처리 플랜트;
- 상기 형성된 슬러지로부터 바이오가스를 생성하는 혐기 소화조;
- 상기 혐기 소화조에서 생성된 바이오가스를 압축시키는 압축기;
- 상기 압축 바이오가스를 이송하는 파이프라인;
- 상기 파이프라인을 통하여 이송된 압축 바이오가스 내 바이오메탄의 업그레이드 유닛; 및
- 분리된 바이오메탄으로부터 수소를 생성하는 스팀-메탄 개질기;

를 포함하는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망을 통합함으로써 폐수처리 플랜트로부터 배출된 바이오가스를 이용하여 수소를 공급하는 통합 수소 공급 망의 실시 방법으로서,

상기 방법은 하기 수학적식 20에 따라 총 경제적 비용 및 총 환경 비용을 동시에 최소화하되, 수소 수요량의 불확실성을 반영하기 위하여 상기 총 경제적 비용 및 상기 총 환경 비용을 각각 하기 수학적식 21 및 수학적식 24에 따라 수소 수요량의 불확실성에 직접적으로 영향을 받지 않는 제1 단계 및 수소 수요량의 불확실성에 직접적으로 영향을 받는 제2 단계를 분리하는 다중목적 2 단계 추계론적(stochastic) 혼합 정수 선형 계획(multi-objective two-stage stochastic mixed integer linear programming; MOTSSMILP) 모형을 이용하고, 그리고

다중목적 함수의 해를 구하기 위하여 ϵ -구속조건법(ϵ -constraints)에 근거한 파레토 분석을 수반하는 방법:

[수학적식 20]

Min. TAC = Total Annual Cost

Min. TEC = Total Environmental Cost

[수학적식 21]

$$TAC = TAC^{first} + TAC^{second}$$

[수학적식 24]

$$TEC = TEC^{first} + TEC^{second}$$

여기서, TAC^{first} 는 제1 단계의 총 경제적 비용(total annual cost), 그리고 TAC^{second} 는 제2 단계의 총 경제적 비용이고, 그리고

TEC^{first} 는 제1 단계의 총 환경 비용(total environmental cost), 그리고 TEC^{second} 는 제2 단계의 총 환경 비용임.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 압축 바이오가스 내 바이오메탄의 업그레이드 유닛은 아민 처리(amine technology; AT) 유닛인 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 3

제2항에 있어서, TAC^{first} 및 TAC^{second} 는 각각 하기 수학적식 22 및 수학적식 23으로 정의되는 것을 특징으로 하는 방법:

[수학식 22]

$$TAC^{fix} = \sum_i \sum_g ACC_{i,g} + \sum_i \sum_g AOC_{i,g} + \sum_{bl} \sum_g PCC_{bl,g} + \sum_{bl} \sum_g POC_{bl,g} \\ + \sum_{bl} \sum_g CCC_{bl,g} + \sum_{bl} \sum_g COC_{bl,g}$$

여기서, $ACC_{i,g}$ 는 혐기소화조(AD)의 설치 비용(capital cost)이고, $AOC_{i,g}$ 는 혐기소화조(AD)의 운전 비용이고, $PCC_{bl,g}$ 는 파이프라인의 설치 비용이고, $POC_{bl,g}$ 는 파이프라인의 운전 비용이고, $CCC_{bl,g}$ 는 압축기의 설치 비용이고, 그리고 $COC_{bl,g}$ 는 압축기의 운전 비용이며,

[수학식 23]

$$TAC^{second} = \zeta \times \sum_x \left[\sum_h HPC_{h,x} + \sum_{b2} (MCC_{b2,x} + MOC_{b2,x}) \right. \\ \left. + \sum_h (SCC_{h,x} + SOC_{h,x}) \right]$$

여기서, $HPC_{h,x}$ 는 수소 구입 비용이고, $MCC_{b2,x}$ 는 아민처리 유닛의 설치 비용이고, $MOC_{b2,x}$ 는 아민처리 유닛의 운전 비용이고, $SCC_{h,x}$ 는 스팀-메탄 개질기의 설치 비용이고, $SOC_{h,x}$ 는 스팀-메탄 개질기의 운전 비용이고, 그리고 ζ 는 수소 수요량의 불확실성에 의하여 발생하는 시나리오들에 대한 확률로서, 1을 전체 시나리오의 총 수로 나눈 값을 의미함.

청구항 4

제3항에 있어서, TEC^{first} 및 TEC^{second} 는 각각 하기 수학식 25 및 수학식 26으로 정의되는 것을 특징으로 하는 방법:

[수학식 25]

$$TEC^{fix} = \sum_h NEEC_h + \sum_{bl} \sum_g CEC_{bl,g}$$

여기서, $NEEC_h$ 는 천연가스 수소 공급 망 내에서 천연가스 추출 환경 비용이고, $CEC_{bl,g}$ 는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망 내 압축기의 자본 설비 비용이며,

[수학식 26]

$$TEC^{second} = \zeta \times \sum_{sc} \sum_h (ESEC_{h,sc} + PSEC_{h,sc})$$

여기서, $ESEC_{h,sc}$ 는 천연가스 수소 공급망 내 스팀-메탄 개질기의 환경비용이고, $PSEC_{h,sc}$ 는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급망 내 스팀-메탄 개질기의 환경 비용이고, 그리고 ζ 는 수소 수요량의 불확실성에 의하여 발생하는 시나리오들에 대한 확률로서, 1을 전체 시나리오의 총 수로 나눈 값을 의미함.

청구항 5

제1항에 있어서, TEC를 추가적으로 감소시키기 위하여, 상기 파레토 분석에 기반하여 하이브리드 탄소-수소 편지 분석을 수행하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

발명의 설명

기술분야

[0001] 본 발명은 폐수처리 플랜트로부터 배출된 바이오가스를 이용한 통합 수소 공급 망의 실시 방법에 관한 것이다. 보다 구체적으로, 본 발명은 기존의 수소 공급 망으로서 천연가스 수소 공급 망(NGHSN)에 생물학적 수소 공급 망으로서 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망(S2BHSN)을 통합한 수소 공급 망에 있어서, 수학적 모델을 통하여 도출된 결과를 기초로 하고, 수소 수요량의 불확실성 하에서 환경 요소 및 비용 요소 간 관계에 기반하여 최종 의사 결정자가 선택할 수 있는 통합 수소 공급 망의 실시(구현 또는 설계) 방법에 관한 것이다.

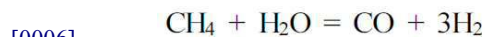
배경기술

[0002] 지구 온난화 등의 환경 문제 및 에너지 문제를 동시에 해결하기 위하여 앞으로 청정에너지이면서 원료자원이 풍부한 수소에너지 개발로 에너지 수급을 개선하는 방안이 시도되고 있다. 실제, 수소는 장래에 가장 촉망받는 에너지원이자 현재에도 다양한 산업(예를 들면, 야금 분야, 석유화학 등)에 사용되고 있다. 특히, 석유화학 플랜트, 연료 전지 등의 분야에서 수소의 수요량은 지속적으로 증가하고 있으며, 향후에도 증가 경향을 나타낼 것으로 예상된다.

[0003] 수소는 자연계에서 풍부하게 존재하는 원소이기는 하나, 주로 물 또는 유기 화합물과 같은 분자 형태로 존재하는 만큼, 순수 수소를 제조하기 위한 공정이 요구되고 있다.

[0004] 이와 관련하여, 수소 생산 공정은 크게 화석 연료에 기반한 스팀 개질 공정 및 전기 분해 공정으로 구분될 수 있는 바, 주로 하기 반응식 1과 같은 스팀-메탄 개질 공정(steam-methane reforming; SMR)으로부터 제조되고 있다.

[0005] [반응식 1]



[0007] 특히, 천연 가스의 스팀 개질 공정은 이미 성숙된 기술로서 다량의 공업적 규모의 수소 생산에 적용되고 있다.

[0008] 또한, 매체 순환(chemical looping)을 이용한 고순도의 수소 및 공정 효율 개선 연구도 수행된 바 있다. 또한, 전기분해 공정의 경우에도 지난 수십년 간 연구되었는 바, 수증의 2개의 전극 사이에 전기를 통과시키는 간편한 방식에 의하여 수소를 생산할 수 있으며, 최근에는 재생 가능한 에너지로부터 유래하는 에너지를 이용하는 전기 분해 공정도 연구된 바 있다. 그러나, 전기 분해 방식은 다량의 에너지 소비가 요구될 뿐만 아니라, 비용이 높아 상업적 규모로 적용하기 곤란하다.

[0009] 이처럼, 스팀 개질 공정 이외의 공정은 기술적으로 한계가 있거나, 대규모 생산에 부적합하고, 또한 수소 제조 가격이 높기 때문에 상용화에 제약이 존재한다.

[0010] 또한, SMR 기술 역시 화석 연료를 기반으로 하기 때문에 환경 친화적인 기술로 볼 수 없으며, CO₂ 포획(CO₂ sequestration)에 의하여도 여전히 환경 문제를 발생시킨다. 특히, 수소 생산을 위한 라이프 사이클 과정에서 온실가스(greenhouse gas; GHG)가 다량으로 배출되고 있다.

[0011] 이처럼, 수소 생산 과정에서는 비용 및 상용 규모의 생산뿐만 아니라 환경적 요소를 고려할 필요가 있다.

[0012] 택일적으로, 바이오매스 또는 폐기물을 통한 수소 생산 연구가 활발히 진행되고 있는 바(예를 들면, 폐수로부터 수소 생산, 미생물 전기분해 공정 등), 상온 상압 조건 하에서 운전할 수 있고 다양한 폐기물을 이용할 수 있기 때문에 환경 친화적인 특성을 갖고 있다.

[0013] 이외에도, 폐수의 생산이 증가함에 따라 폐수 처리 및 수소 생산을 동시에 구현하는 기술도 개발되었는 바, 혐기성 소화, 발효 등을 수반한다.

[0014] 폐수, 구체적으로 양돈, 축산, 양계 농장에서 발생되는 분뇨 폐기물, 도시에서 대량으로 배출되는 음식물 폐기물 등을 포함하는 유기성 폐기물은 소정 요건을 구비한 폐수처리 플랜트에서 인체 건강 및 환경에 덜 영향을 미치는 성분으로 전환되는 과정을 거치고 있다.

[0015] 그러나, 폐수처리 플랜트는 고비용 처리 공정을 수반할 뿐만 아니라, 폐수처리 플랜트의 설치 역시 제한적이다. 특히, 소규모의 영세 축산 농가, 소규모의 음식점 등의 경우에는 폐기물 처리장치를 설치하는 대신에 생활 폐기

물과 함께 폐기하거나, 또는 분리하여 폐기한다 해도 이를 별도의 시설에서 폐기해야 하는 실정이다. 한편, 폐수처리 플랜트에서는 전형적으로 분뇨 폐기물, 음식물 폐기물 등의 유기성 폐기물을 혐기 소화 공정(AD process)에 의하여 처리하고 있는 바, 이로부터 바이오가스가 생성된다. 이러한 바이오가스는 다량의 메탄을 함유하는 고열량의 가스 성분이다.

- [0016] 이러한 바이오가스는 열 병합 발전의 에너지 원으로 활용됨으로써 통합 시스템의 효율을 개선할 수 있고(국내특허공개번호 제2015-106256호, J. Renewable Sustainable Energy 8, 032701(2016), 바이오가스 업그레이드 기술(예를 들면, 유기성 폐기물의 혐기성 소화 과정에서 발생하는 바이오 가스를 탈황 처리하고 분리 공정 처리함)을 이용하여 메탄을 생산할 수도 있다.
- [0017] 택일적으로, 폐수를 이용한 수소 생산 소스로서 혐기 소화 프로세스 및 이로부터 생성된 바이오가스를 이용한 스팀-메탄 개질 공정을 통합한 공정 기술도 제안된 바 있다. 구체적으로, 유기성 폐기물을 혐기성 소화 처리하여 바이오가스를 생성하고, 생성된 바이오가스를 정제 또는 업그레이드한 다음, 이를 스팀-메탄 개질 반응을 통하여 수소로 전환시키는 기술을 예시할 수 있다(국내특허번호 제1308405호, Korean Hydrogen and New Energy Society(2016. 4), Vol. 27, No. 2, pp. 135-143 등).
- [0018] 상술한 바와 같이, 폐수처리 플랜트로부터 생성되는 슬러지, 혐기 공정으로 생성되는 바이오가스, 바이오가스 업그레이드 기술로부터 생성되는 바이오메탄, 그리고 스팀-메탄 개질 반응으로부터 생성되는 수소를 포함하는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망(S2BHSN)이 설계될 수 있다. 그러나, 기존의 폐수처리 플랜트 및 수소 공급 망의 통합 시스템에 관한 연구의 경우, 통합 공정을 구성하는 물리적 구성 유닛의 성능 개선, 복수의 개별 유닛 간 결합 방식 변경 등을 중심으로 이루어졌다.
- [0019] 이와 관련하여, 천연가스 수소 공급 망(NGHSN)에 생물학적 수소 공급 망으로서 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망(S2BHSN)을 통합하는 수소 공급 망에 있어서, 경제적 요소 및 환경적 요소를 모두 고려할 필요가 있다. 특히, 수소 수요량의 불확실 조건 하에서 상업적 규모의 수소를 생산함에서 경제적 요소 및 환경적 요소를 동시에 고려하여 최종 정책 결정권자가 다양한 선택지로부터 원하는 최적의 방안을 선택할 수 있도록 하는 모델에 관한 연구는 전혀 알려진 바 없는 실정이다.
- [0020] 그 결과, 종래의 연구에서는 폐수처리 플랜트와 열병합 발전 시스템의 통합시스템을 개발함에 있어서, 폐수처리 플랜트에서 발생하는 바이오가스를 이용한 열 병합 발전이 환경에 미치는 영향을 고려하지 않는 한계를 갖고 있다. 특히, 열 병합 발전의 단위 소비에너지 당 운전 및 설치 비용, 그리고 단위 소비에너지 당 열 병합 발전의 운전 및 설치 시 발생하는 환경적 영향을 동시에 최소화하는 방안이 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0021] 본 개시 내용의 구체예에서는 폐수처리 플랜트로부터 슬러지/바이오가스/바이오메탄 발생 및 전환 공정의 설치 및 운영 비용과 물질 운반에 필요한 파이프라인 설치 및 운영 비용을 최소화함과 동시에 바이오가스-수소 통합 망의 전체 환경 비용을 최소화할 수 있는 폐수처리장-유래 바이오가스 기반의 수소 생산을 통한 바이오가스-수소 통합 망의 실시 방법을 제공하고자 한다. 특히, 기존 수소 생산 공정(화석 에너지 기반 수소 생산)을 유지함에 따라 전체 비용은 증가하지 않으나 환경 비용은 증가하는 한편, 새로운 생물학 기반의 공정(슬러지/바이오가스/바이오메탄)들을 추가할 경우에 전체 비용은 증가하지만 환경 비용은 감소하는 점, 그리고 수소의 수요량에 불확실성을 반영한 통합적 모델을 제공하고, 이를 최적화 해법을 통하여 실시 또는 운영하는 방안을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

- [0022] 본 개시 내용의 일 구체예에 따르면,
- [0023] 천연가스 수소 공급 망에,
- [0024] a) 유입 폐수를 처리하고, 이로부터 전환된 슬러지를 형성하는 폐수 처리 플랜트;
- [0025] b) 상기 형성된 슬러지로부터 바이오가스를 생성하는 혐기 소화조;
- [0026] c) 상기 혐기 소화조에서 생성된 바이오가스를 압축시키는 압축기;

[0027] d) 상기 압축 바이오가스를 이송하는 파이프라인;

[0028] e) 상기 파이프라인을 통하여 이송된 압축 바이오가스 내 바이오메탄의 업그레이드 유닛; 및

[0029] f) 상기 분리된 바이오메탄으로부터 수소를 생성하는 스팀-메탄 개질기;

[0030] 를 포함하는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망을 통합함으로써 폐수처리 플랜트로부터 배출된 바이오가스를 이용하여 수소를 공급하는 통합 수소 공급 망의 실시 방법으로서,

[0031] 상기 방법은 하기 수학식 20에 따라 총 경제적 비용 및 총 환경적 비용을 동시에 최소화하되, 수소 수요량의 불확실성을 반영하기 위하여 상기 총 경제적 비용 및 상기 총 환경 비용을 각각 하기 수학식 21 및 수학식 24에 따라 수소 수요량의 불확실성에 직접적으로 영향을 받지 않는 제1 단계 및 수소 수요량의 불확실성에 직접적으로 영향을 받는 제2 단계를 분리하는 다중목적 2 단계 추계론적(stochastic) 혼합 정수 선형 계획(multi-objective two-stage stochastic mixed integer linear programming; MOTSSMILP) 모형을 이용하고, 그리고

[0032] 다중목적 함수의 해를 구하기 위하여 ε -구속조건법(ε -constraints)에 근거한 파레토 분석을 수반하는 방법이 제공된다:

[0033] [수학식 20]

Min. TAC = Total Annual Cost

Min. TEC = Total Environmental Cost

[0034]

[수학식 21]

$$TAC = TAC^{first} + TAC^{second}$$

[0036]

[수학식 24]

$$TEC = TEC^{first} + TEC^{second}$$

[0038]

[0039] 여기서, TAC^{first} 는 제1 단계의 총 경제적 비용(total annual cost), 그리고 TAC^{second} 는 제2 단계의 총 경제적 비용이고, 그리고

[0040] TEC^{first} 는 제1 단계의 총 환경 비용(total environmental cost), 그리고 TEC^{second} 는 제2 단계의 총 환경 비용이다.

[0041] 예시적 구체예에 따르면, 설치 및 운영 비용에 관한 항목인 TAC^{first} 및 TAC^{second} 는 각각 하기 수학식 22 및 수학식 23으로 정의될 수 있다:

[0042] [수학식 22]

$$TAC^{first} = \sum_z \sum_{\varepsilon} ACC_{z,\varepsilon} + \sum_z \sum_{\varepsilon} AOC_{z,\varepsilon} + \sum_{bl} \sum_{\varepsilon} PCC_{bl,\varepsilon} + \sum_{bl} \sum_{\varepsilon} POC_{bl,\varepsilon} + \sum_{bl} \sum_{\varepsilon} CCC_{bl,\varepsilon} + \sum_{bl} \sum_{\varepsilon} COC_{bl,\varepsilon}$$

[0043]

[0044] 여기서, $ACC_{z,\varepsilon}$ 는 혐기소화조(AD)의 설치 비용(capital cost)이고, $AOC_{z,\varepsilon}$ 는 혐기소화조(AD)의 운전 비용이고, $PCC_{bl,\varepsilon}$ 는 파이프라인의 설치 비용이고, $POC_{bl,\varepsilon}$ 는 파이프라인의 운전 비용이고, $CCC_{bl,\varepsilon}$ 는 압축기의 설치 비용이고, 그리고 $COC_{bl,\varepsilon}$ 는 압축기의 운전 비용이며,

[0045] [수학식 23]

$$TAC^{second} = \zeta \times \sum_x \left[\sum_h HPC_{h,x} + \sum_{bz} (MCC_{bz,x} + MOC_{bz,x}) + \sum_h (SCC_{h,x} + SOC_{h,x}) \right]$$

[0046]

[0047] 여기서, HPC_{hx} 는 수소 구입 비용이고, MCC_{bz} 는 아민처리 유닛의 설치 비용이고, MDC_{bz} 는 아민처리 유닛의 운전 비용이고, SCC_{hx} 는 스팀-메탄 개질기의 설치 비용이고, SOC_{hx} 는 스팀-메탄 개질기의 운전 비용이고, 그리고 ζ 는 수소 수요량의 불확실성에 의하여 발생하는 시나리오들에 대한 확률로서, 1을 전체 시나리오의 총수로 나눈 값을 의미함.

[0048] 예시적 구체예에 따르면, 환경 비용인 TEC^{first} 및 TEC^{second} 는 각각 하기 수학식 25 및 수학식 26으로 정의될 수 있다:

[0049] [수학식 25]

$$TEC^{first} = \sum_h NEEC_h + \sum_{b,j} \sum_g CEC_{bj,g}$$

[0050]

[0051] 여기서, $NEEC_h$ 는 천연가스 수소 공급망 내에서 천연가스 추출 환경비용이고, $CEC_{bj,g}$ 는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급망 내 압축기의 설치 비용이며,

[0052] [수학식 26]

$$TEC^{second} = \zeta \times \sum_{sc} \sum_h (ESEC_{h,sc} + PSEC_{h,x})$$

[0053]

[0054] 여기서, $ESEC_{h,x}$ 는 천연가스 수소 공급망 내 스팀-메탄 개질기의 환경비용이고, $PSEC_{h,x}$ 는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급망 내 스팀-메탄 개질기의 환경비용이고, 그리고 ζ 는 상기 수학식 23에서 사용된 확률과 동일함.

발명의 효과

[0055] 본 개시 내용의 구체예에 따라 천연가스 수소 공급망에 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급망을 통합함으로써 폐수처리 플랜트로부터 배출된 바이오가스를 이용하여 수소를 공급하는 통합 수소 공급 망의 운전 방법은 바이오가스-수소 통합망의 구축 시 폐수처리장으로부터 슬러지/바이오가스/바이오메탄 발생 및 전환 공정의 설치 및 운영 비용과 물질 운반에 필요한 파이프라인 설치 및 운영 비용을 최소화하는 동시에 수소 통합망의 전체 환경 비용을 최소화할 수 있는 최적 방안에 관한 수학적 모델을 제공하여 최종 결정론자(decision maker)는 상기 수학적 모델로부터 얻어진 결과들을 바탕으로 환경 요소와 비용 요소의 관계를 파악하고, 이에 근거하여 최적화된 운전 방안을 선택할 수 있도록 하는 장점을 제공한다.

도면의 간단한 설명

[0056] 도 1은 일 구체예에 따른 통합 수소 공급 망(IHSN)의 개념도이고;
 도 2a는 일 구체예에 따른 통합 수소 공급 망(IHSN)의 의사 결정 알고리즘을 나타내는 순서도이고;
 도 2b는 다른 구체예에 따른 통합 수소 공급 망(IHSN)의 의사 결정 알고리즘을 나타내는 순서도이고;
 도 3은 하이브리드 탄소-수소 핀치(pinch) 분석을 도시하는 그래프이고;
 도 4는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망(S2BHSN) 구조의 흐름도이고;
 도 5는 케이스 스터비의 TAC 및 TEC의 파레토(Pareto) 그래프이고;
 도 6은 S2BHSN 구조 및 파레토 분석에 기초하여 해당 케이스의 NGHSN 및 S2BHSN에서 생산된 수소의량을 보여주는 도면이고;
 도 7a는 수소 수요 및 TEC의 HCH 핀치 분석 결과를 나타내는 그래프이고;
 도 7b는 섹션 간 TEC를 대비한 결과를 보여주는 도면이고;
 도 8a는 풍력 설치를 구비한 HSN의 민감도 분석(풍력 설치의 위치) 결과를 보여주는 도면이고; 그리고

도 8b는 보충적인 풍력 에너지를 구비한 HSN의 HCH 펀치 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0057] 본 발명은 하기의 설명에 의하여 모두 달성될 수 있다. 하기의 설명은 본 발명의 바람직한 구체예를 기술하는 것으로 이해되어야 하며, 본 발명이 반드시 이에 한정되는 것은 아니다. 또한, 첨부된 도면은 이해를 돕기 위한 것으로, 본 발명이 이에 한정되는 것은 아니며, 개별 구성에 관한 세부 사항은 후술하는 관련 기재의 구체적 취지에 의하여 적절히 이해될 수 있다.
- [0058] 본 명세서에 있어서, 어떠한 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 별도의 언급이 없는 한, 다른 구성 요소 및/또는 단계를 더 포함할 수 있음을 의미한다.
- [0059] "다중목적 최적설계"는 주어진 제한조건을 만족시키면서 복수의 목적함수를 최소화 또는 최대화시키도록 설계변수의 값을 조절함으로써 설계하고자 하는 시스템의 성능을 향상시키는 기술을 의미할 수 있다.
- [0060] "2단계 추계론적 선형계획(two-stage stochastic linear program)"은 미래의 불확실한 요소가 어떻게 귀결될지를 모르면서 결정을 내리는 것으로 인하여 추후에 전파되는 일련의 파급효과가 모형 측면에서 불가능해의 영역에 들어가 있지 않도록 대응적 행동(recourse action)이 감안되도록 한 선형계획모형을 의미할 수 있다. 이때, "선형 계획"은 실제 문제의 수학적 모델화를 통하여 최적화하려는 수리계획법의 한 분야로서, "선형"이라는 의미는 수학적 함수들이 1차로 구성되어야 함을 의미할 수 있고, 수학적 모델을 이용하여 가능한 대안 중에서 정해진 목표를 최선으로 달성하는 결과를 얻고자 하는 것이다.
- [0061] " ϵ -구속조건 방법(ϵ -constraint method)"은 다목적 최적설계의 방법의 하나로서 주어진 하나의 목적함수를 제외한 다른 모든 목적함수의 최대 수준을 정해놓고 이 범위 내에서 해당 목적함수를 최소화시키는 것을 의미할 수 있다. 즉, 최대 수준을 조금씩 바꾸면서 최적설계를 수행하고, 이 과정을 모든 목적함수에 대하여 수행하게 된다.
- [0062] "파레토 최적 해(Pareto optimal solution)"는 성취하고자 하는 목적이 1 이상인 경우, 개별 목적(또는 기준)들이 모두 고려된 열등하지 않는 해(non-inferior solution)를 의미할 수 있다. 따라서, 다른 최적 목적 값을 희생시키지 않고는 어느 하나의 목적 값을 개선시킬 수 없는 효율적인 해로서, 주어진 환경에서 취할 수 있는 최선의 해를 의미할 수 있다. 파레토 최적해는 대개 그 수가 많아서 의사결정자의 효용 기준에 따라 따로 선별될 필요가 있다.
- [0063] 본 개시 내용에 따르면, 폐수처리 플랜트로부터 슬러지/바이오가스/바이오메탄 발생 및 전환 공정의 설치 및 운영 비용, 그리고 물질 운반에 필요한 파이프라인 설치 및 운영 비용을 최소화하여야 하며, 동시에 바이오가스-수소 통합 망의 전체 환경 비용을 최소화해야 한다. 구체적으로, 기존 수소 공급 망(화석 에너지 기반 수소 생산)을 유지할 경우, 전체 비용은 증가하지는 않으나 환경 비용은 증가하며, 신규의 바이오 기반 수소 공급 망(슬러지/바이오가스/바이오메탄)을 추가할 경우, 전체 비용은 증가하지만 환경 비용은 감소한다. 이와 같이 바이오가스-수소 통합 네트워크(IHSN) 구축에 있어서 경제적 비용 및 환경 비용을 동시에 고려하기 위하여, 본 구체예에서는 다중목적 최적화 방식을 이용한 수학적 모델을 적용할 수 있다.
- [0064] 또한, 수소의 수요량의 불확실성을 반영해야 하는 바, 2단계 추계론적 선형계획(two-stage stochastic programming)에 따른 수학적 모델을 이용하고, ϵ -구속조건(constraint) 방법을 통하여 여러 가지 해(solution) 또는 방안을 도출할 수 있다. 즉, 경제적 비용 및 환경 비용을 각각 최소화하기 위하여 2가지 목적함수를 이용하되, 현실성을 반영하고자 수소 수요량의 불확실성을 고려하고, 비선형 근사 및 다중목적 함수의 해를 구하기 위하여 ϵ -구속조건 방법을 이용하고, 파레토 세트에 기반한 파레토 분석을 수행한다.
- [0065] 이처럼, 일 구체예에 따른 통합 수소 공급 망(IHSN)은 의사 결정 알고리즘을 따라 수행되며, 환경 요소 비중에 따라 다른 망 구조를 고려하며, 따라서 여러 가지 최적의 해(optimal solution) 또는 방안을 도출할 수 있고, 이를 의사결정자(decision maker)에게 제시할 수 있다. 의사 결정자는 이러한 수학적 모델을 통하여 도출된 결과들을 바탕으로 환경 요소와 비용 요소의 관계를 파악하고 적절한 비중을 통하여 원하는 시나리오를 선택할 수 있다.
- [0066] 도 1은 본 개시 내용의 일 구체예에 따른 통합 수소 공급 망(IHSN)의 개념도이다.
- [0067] 도시된 구체예에 따르면, 기존의 수소 공급 망(NGHSN)에 통합되는 생물학적 기반의 HSN으로서, 유입 폐수를 처리하고, 이로부터 전환된 슬러지를 형성하는 폐수 처리 플랜트, 슬러지로부터 바이오가스를 생성하는 혐기 소화

조, 혐기 소화조에서 생성된 바이오가스를 압축시키는 압축기, 압축 바이오가스를 이송하는 파이프라인, 파이프라인을 통하여 이송된 압축 바이오가스 내 바이오메탄의 업그레이드 유닛, 및 분리된 바이오메탄으로부터 수소를 생성하는 스팀-메탄 개질기를 포함할 수 있다.

- [0068] 예시적 구체예에 따르면, 폐수처리 플랜트(WWTP)에서 발생하는 슬러지는 가열될 수 있고, 혐기 소화조 내로 도입되는 바, 혐기 소화조 내의 온도는, 예를 들면 약 290 내지 350 K, 구체적으로 약 300 내지 330 K, 보다 구체적으로 약 305 내지 320 K 범위 내일 수 있다. 이와 같이, 혐기 소화조(AD)로부터 바이오가스가 발생하는 바, 이러한 바이오가스는 메탄-풍부 가스로서, 예를 들면 가스 내 메탄의 함량은, 전형적으로 적어도 약 50 체적%, 보다 전형적으로 약 60 내지 80 체적%, 특히 전형적으로 약 65 내지 75 체적% 범위일 수 있고, 바이오가스 중 메탄 이외의 기타 성분의 예는 이산화탄소, 수분, 황화수소, 암모니아, 일산화탄소 등일 수 있다. 다만, 상기 수치 범위는 예시적인 의미로 이해될 수 있다.
- [0069] 이와 같이 생성된 바이오가스는 파이프라인을 통하여 이송될 수 있고, 이때 이송을 위하여 압축기가 사용될 수 있다. 이러한 압축기의 압력은, 예를 들면 약 30 내지 70 MPa, 구체적으로 약 35 내지 60 MPa, 보다 구체적으로 약 40 내지 50 MPa 범위일 수 있으나, 이는 예시적인 것으로 이해될 수 있다.
- [0070] 전술한 바와 같이, 압축된 바이오가스는 바이오메탄 이외에 다른 성분(일종의 불순물)을 함유하고 있기 때문에 이를 아민 처리(또는 스크러빙) 유닛과 같은 업그레이드 유닛을 이용하여 가급적 순수한 메탄 성분을 얻도록 처리할 수 있다. 이러한 아민 처리 유닛은 바이오가스와 아민을 접촉시켜 화학적으로 흡수시켜 정제하는 방식일 수 있다. 사용되는 아민의 경우, 모노에탄올아민, 디에탄올아민, 메틸디에탄올아민 등과 같이 암모니아로부터 유래된 유기 화학 화합물일 수 있고, 예시적으로 아민 용액 형태로 처리 가능하다. 이러한 바이오가스에 대한 아민 처리(AT) 기술은 Huertas et al, Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine Absorption, 2011 등에 상세히 기술되어 있는 바, 상기 문헌은 본 명세서의 참고자료로 포함된다.
- [0071] 이와 같이, 정제된 바이오메탄을 얻은 후에 전술한 바와 같이 스팀-메탄 개질 반응(SMR)을 통하여 수소를 생성할 수 있다. 예시적으로, SMR 반응은, 예를 들면 약 350 내지 650℃, 구체적으로 약 400 내지 600℃, 보다 구체적으로 약 450 내지 550℃ 범위의 온도 조건 하에서 수행될 수 있다.
- [0072] 한편, 도 1을 참조하면, 통합 수소 공급망(IHSN)은 다양한 프로세스에 기초하여 천연가스 수소 공급 망(NGHSN) 및 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망(S2BHSN)로 이루어진다. 본 구체예에서 개발된 모델은 하기의 3가지 주된 세트를 포함할 수 있다:
- [0073] 1. 물질의 흐름 속도 세트(set): 화석연료, 슬러지, 바이오가스, 바이오메탄 및 수소
- [0074] 2. 프로세스 세트: WWTP, AD, 아민 테크놀로지(AT), 운송 및 SMR
- [0075] 3. NGHSN 및 S2BHSN 내 에너지 세트
- [0076] 도 2a는 일 구체예에 따른 통합 수소 공급 망(IHSN)의 의사 결정 알고리즘을 나타내는 순서도로서, 해결 문제는 MOTSSMILP 알고리즘에 따라 포괄적으로 기재되어 있다. 알고리즘의 시작 단계로서 주어진 데이터(data), 파라미터(parameter), 변수(variable) 및 가정(assumption)을 분류하여 결정될 수 있다.
- [0077] 이와 관련하여, 고정 데이터는 제안된 모델을 해당 지역에 사례 연구로 적용하기 위한 해당 지역들에 해당되는 기본 데이터를 의미할 수 있는 바, 보다 구체적으로는 개별 지역의 폐수처리장에서 사용되는 하수량, 지역 간 거리 등을 포함할 수 있다.
- [0078] 또한, 파라미터는 기본적으로 개별 공정에 유입되는 물질과 배출되는 물질 간의 전환율, 설치 및 운영 비용(문헌 참조 후 결정 변수에서 얻어지는 정확한 공정 내 물질 유량을 바탕으로 six-tenth rule을 적용하여 최종 설치 및 운영 비용을 산출할 수 있음), 주요 물질의 화학 물리적 특성 값, 이산화탄소 배출로 인한 환경 비용 산출에 필요한 요소 등을 포함할 수 있다.
- [0079] 결정 변수는 각 공정에 유입되고 배출되는 물질들의 양, 공정의 설치 및 운영 비용, 천연가스를 통하여 수소 생산 시 발생하는 이산화탄소에 대한 환경 비용, 하수처리장의 통합 유무 등을 포함한 것일 수 있다.
- [0080] 이외에도 가정 항목에서는 불확실성으로 인하여 발생하는 시나리오들의 발생 확률은 동일하다고 전제한다.
- [0081] 하기 표 1에 알고리즘 내에서 사용된 주요 파라미터, 결정 변수 및 가정의 예를 나타내었다.

표 1

파라미터	세부 사항
원료로서 폐수 및 NG에 대한 데이터	개별 지역 내 폐수 처리능 및 NG 정보(예를 들면, 수입 가격, 발열량 및 추출 환경 비용)
모든 물질의 물성	폐수, 슬러지, 바이오가스, 바이오메탄, NG, 및 H ₂ 의 밀도
전환율 파라미터	어느 한 물질로부터 다른 물질로의 질량 전환율 인자
설비 비용 데이터	모든 설비(운송 모드 포함)의 단위 또는 기준 자본 및 운전 비용
에너지 소비 데이터	문헌으로부터 명시된 프로세스 내에서 사용된 표준 량의 에너지
에너지 전환율 및 GHG 스코어	전기로 전환되는 에너지 단위 전환율 및 물질의 전환율, 그리고 발전 플랜트로부터의 GHG 스코어 및 천연가스 추출
결정 변수	
WWTP-AD 프로세스	IHSN 내 WWTP-AD 프로세스의 위치
유속	모든 물질의 질량 유속 (폐수, 슬러지, 바이오가스, 바이오메탄 및 NG), 그리고 NGHSN 및 S2BHSN에서 생산되는 H ₂
에너지 소비 및 GHG 스코어	NG 추출 프로세스를 포함하여 개별 프로세스에서 소비되는 에너지 및 배출된 GHG의 량
가정	
	1. S2BHSN 내에서의 운송 모드는 파이프라인이고;
	2. H ₂ 생산 설비는 PCI 내에 설치되고;
	3. NG의 운송과 관련된 비용은 제외됨

[0082]

[0083]

예시적 구체예에 따르면, 도 2b에 도시된 바와 같이 추가적으로 하이브리드 탄소-수소(HCH) 핀치 분석을 수행할 수 있는 바, 이 경우 추가 에너지원을 이용하여 수행될 수 있다. 즉, 기존의 수소 공급 망의 단독 운영과 본 구체예에서 제시된 모델의 스텝 별 환경 비용을 분석할 수 있고, 핀치 분석을 기반으로 하여 재생 가능한(또는 신재생) 에너지 시스템, 구체적으로 보충적인 풍력 에너지의 도입 여부에 따른 민감도(sensitivity) 분석을 수행할 수 있다.

[0084]

이와 관련하여, 도 3은 하이브리드 탄소-수소 핀치(pinch) 분석을 도시하는 그래프이다.

[0085]

상기 도면에서는 다른 프로세스 내 수소 수요량에 따른 동등한 이산화탄소(CO₂)의 량(kg)을 나타낸다. GHG의 배출량은 개별 공급 망 내 프로세스 또는 설치의 타입을 기초하며, 환경 비용을 평가하기 위하여 표준 유닛으로서 동등한 이산화탄소의 량으로 변환될 수 있다. 이처럼, CHC 핀치 분석을 적용함으로써 기존의 HSN과 IHSN 간의 전체 환경 비용의 대비 이외에도, 수소 수요량을 충족하기 위한 환경 영향을 시각화할 수 있다.

[0086]

A. 수학적 모델

[0087]

본 구체예에 있어서, 수학적 모델은 구별되는 프로세스에 대한 수 개의 질량 밸런스 식, 그리고 2가지 IHSN의 다른 목적(즉, 경제적 비용 및 환경 비용)을 충족하기 위한 2개의 주된 목적 함수로 이루어진다.

[0088]

보다 현실적 상황을 반영하기 위하여 수소 수요량의 불확실성이 반영되어 개별 목적 함수 내에서 2개의 단계를 형성하게 된다. 전형적으로, 추계론적 접근법에서 단계는 설치 비용 및 운전 비용에 의하여 영향을 받는다. 그러나, 본 구체예에 따른 모델의 경우, 단계는 수소 생산과 관련하여 설정되는 바, 이는 수소 생산 준비를 위한 후보 설치가 많은 지역에 위치하거나, 또는 수소 생산 설치가 공장(예를 들면, 수소 수요처, 구체적으로 석유화학 산업(PCI)) 단지 내에 설치되기 때문이다. 이는 (i) 제1 단계에서의 파라미터 및 변수에 관한 결정은 수소 수요량 불확실성에 의하여 영향받기에 앞서 결정되고, 그리고 (ii) 확률 분포를 갖는 제2 단계 내 파라미터 및 변수는 수소 수요량의 불확실성 시나리오에 따라 결정됨을 의미한다. 이와 관련하여, 수소 수요량의 불확실성을 제공하기 위하여 몬테 카를로(Monte Carlo) 샘플링 방법이 이용된다. 예시적 구체예에 따르면, 수소 수요량의 불확실성에 영향을 받지 않는 단계(구체적으로, 스팀-메탄 개질(SMR)까지는 제1 단계, 그리고 수소 수요량의 불확실성에 영향을 받는 단계(구체적으로 스팀-메탄 개질) 이후에는 제2 단계로 구분할 수 있다.

- [0089] 질량 밸런스
- [0090] 수요량 구속(Demand constraint)
- [0091] 도 4는 슬러지-바이오가스-바이오메탄-수소 공급 망(S2BHSN) 구조의 흐름도이다.
- [0092] 상기 도면을 참조하면, 수소 수요량을 충족시키기 위하여 기존의 수소 공급망(HSN)에서의 수소 공급뿐만 아니라, 본 구체예에서 제시되는 통합 수소 공급 망(IHSN)로부터의 수소 공급이 함께 이루어진다. 또한, 하기 수학적 식 1에서와 같이 수소의 공급 총량은 수소 수요량보다 같거나 커야 한다.
- [0093] 상기 식에서, $x_{2h,sc}$ 는 본 구체예에서 새롭게 제시되는 수소 공급 망, 즉 S2BHSN 내 수소 유속(flow rate)이다. 혐기성 소화(AD) 공정이 설치된 폐수처리 플랜트(WWTP)로부터 발생된 바이오가스는 운송 모드(transportation mode)를 거쳐 바이오가스 업그레이드 설비(upgrade facility), 구체적으로 아민 테크놀로지 또는 아민 처리(AT) 유닛으로 이송되고, 바이오메탄으로 전환된 후에 스팀-메탄 개질(SMR) 공정을 거쳐 최종적으로 고순도의 수소가 생성된다(도 4 참조).
- [0094] $x_{1h,sc}$ 은 기존의 수소 공급 망(NGHSN) 내 수소의 유속으로서, NG 수입을 거쳐 기존의 SMR 공정을 통하여 생성된다. 하기 수학적 식 2에서 나타낸 바와 같이, 소비되는 천연가스의 유속 또는 량(x_{NGh})은 기존의 수소 공급 망(NGHSN) 내의 수소 유속과 NG에 대한 수소로의 전환 비(즉, NG에 대한 수소의 전환 비; $HNGC$)의 곱 또는 이보다 크다.
- [0095] [수학적 식 1]
- [0096]
$$HDP_{sc} \leq \sum_h x_{1h,sc} + \sum_h x_{2h,sc}$$
- [0097] [수학적 식 2]
- [0098]
$$x_{NGh} \geq HNGC \times x_{1h,sc}$$
- [0099] 폐수처리 플랜트(WWTP)
- [0100] WWTP는 다수의 지역에 다양한 규모로 존재한다. 하기 수학적 식 3에 나타낸 바와 같이, 폐수로부터 슬러지로의 질량 전환 비(conversion ratio of sludge mass to wastewater mass; $WWSC$)는 슬러지의 발생량(SR) 및 폐수의 유입량(WWR)에 의하여 결정된다.
- [0101] 일 구체예에 따르면, 하기 수학적 식 4에서와 같이, 제안된 수소 공급 망의 후보 WWTP 지역에서의 슬러지 발생량($x_{s,g}$)은 폐수의 량($WWFR_{w,g}$)에 따라 계산되며, 이항 변수(binary variable)인 b_g^{WWTP} 는 WWTP가 채택되는지 여부를 결정한다.
- [0102] [수학적 식 3]
- [0103]
$$WWSC = \frac{SR \times SD}{WWR \times WWD}$$
- [0104] [수학적 식 4]
- [0105]
$$\sum_g x_{s,g} \leq WWSC \times \sum_w WWFR_{w,g} \times b_g^{WWTP}$$
- [0106] 바이오가스 생성용 혐기성 소화(AD) 공정
- [0107] 혐기성 소화(AD) 공정과 관련된 몇 가지 공정이 존재함에도 불구하고, 본 구체예에서는 전체 바이오가스의 발생량 및 에너지 소비량이 주요 변수이므로 나머지 비중이 작은 공정은 고려하지 않는다. 수학적 식 5에 나타낸 바와 같이, AD 공정으로부터 발생하는 바이오가스($total_x_{b1,g}$)는 운송 모드로 전달되는 바이오가스의 량($x_{b1,g}$) 및 에너지 생산을 위하여 재사용되는 바이오가스의 량($x_{b1',g}$)으로 구분된다(도 4b 참조). 재사용되는 바이오가스는 AD 공정 내 에너지 수요량을 충족할 수 있다.

[0108] [수학식 5]

$$total_x_{bl,g} = x_{bl,g} + x_{bl',g}$$

[0110] 수학식 6에 나타난 바와 같이, 슬러지에 대한 총 바이오가스의 량의 비($STBGC$)는 전체 바이오가스 량(BGR^{AD}) 및 슬러지의 량에 의하여 계산될 수 있다. 또한, 수학식 7에서와 같이 지역 별 각각의 WWTP 내에서 생산되는 바이오가스의 량은 상기 비에 의하여 예측된다.

[0111] [수학식 6]

$$STBGC = \frac{BGR^{AD} \times BGD}{SR \times SD}$$

[0113] [수학식 7]

$$\sum_{bl} total_x_{bl,g} \leq STBGC \times \sum_s x_{s,g}$$

[0115] BSM2(benchmark simulation model No. 2)는 WWTP와 AD 공정을 모두 고려한 기준 모델(reference model)인 반면, BSM1(benchmark simulation model No. 1)은 WWTP만을 고려한 기준 모델이다. 따라서, 하기 수학식 8과 같이 AD 공정의 설치에 의한 에너지 발생량($ER^{WWTP-AD}$)은 참고 문헌(reference)에 의하여 결정된다.

[0116] [수학식 8]

$$ER^{WWTP-AD} = E^{BSM2} - E^{BSM1}$$

[0118] 하기 수학식 9에서와 같이, AD 공정에서 소비되는 에너지에 필요한 바이오가스의 량($NBGE$)은 AD 공정의 설치로 인한 에너지 소비, 메탄의 전기로의 전환 인자(MEC), 메탄의 밀도 및 바이오 가스 내 메탄의 함량($MRBG$)에 기초하여 계산된다.

[0119] [수학식 9]

$$NBGE = \frac{ER^{WWTP-AD}}{MEC \times MD \times MRBG}$$

[0121] 또한, 하기 수학식 10 및 11에 나타난 바와 같이, 재사용되는 바이오가스의 질량 전환율은 AD 공정 내에서 에너지 소비에 필요한 바이오가스의 량 및 생성된 슬러지의 량을 이용하여 결정되고, 이를 통하여 재사용되는 바이오가스의 유속에 대한 구속조건을 결정할 수 있다.

[0122] [수학식 10]

$$SRBGC = \frac{NBGE \times BGD}{SR \times SD}$$

[0124] [수학식 11]

$$\sum_{bl'} x_{bl',g} \geq SRBGC \times \sum_s x_{s,g}$$

[0126] 운송 모드(transportation mode)

[0127] AD 공정으로부터 발생된 바이오가스는 바이오메탄으로의 전환을 위하여 업그레이드 설비로 이송된다. 일 구체예에 따르면, 이송 수단으로 파이프라인을 선택할 수 있으며, 효과적인 이송을 위하여 압축기가 사용된다(도 4c 및 도 4d 참조). 이와 관련하여, 운송 중에 요구되는 에너지($E_{bl,g}^{compressor}$)는 압축기에서만 발생한다고 가정할 수 있다. 또한, 하기 수학식 12에서 나타난 바와 같이, 파이프라인을 통하여 이송되는 바이오가스의 손실은 없는 것으로 가정할 수 있다.

[0128] [수학식 12]

$$E_{b1,g}^{compressor} = EU \times x_{b1,g}$$

[0129]

[0130] 바이오가스의 업그레이드 유닛

[0131] 기존의 수소 공급 망에서는 SMR의 공급원료로서 천연가스(NG)를 사용하기 때문에 바이오가스를 업그레이드하여 높은 메탄 비를 갖도록 하는 것이 필수적이다. 이러한 바이오가스 업그레이드 공정으로서 아민 테크놀로지(AT)를 선택할 수 있으며, AT 내에서의 에너지 소비는 재사용되는 바이오메탄 유속($x_{b2',sc}$)에 의하여 커버된다. 하기 수학식 13 및 도 4e에 따르면, AT로부터의 전체 바이오메탄 생산($total_x_{b2,sc}$)은 SMR로 이송되는 바이오메탄의 유속($x_{b2,sc}$)과 재사용되는 바이오메탄의 유속의 합과 같다.

[0132] [수학식 13]

$$total_x_{b2,sc} = x_{b2,sc} + x_{b2',sc}$$

[0133]

[0134] 하기 수학식 14 및 15에 나타낸 바와 같이, 전체 바이오메탄 생산량($BGBMC$)은 바이오가스 소비량(BGR)에 대한 바이오메탄 생산량(BMR)의 비에 의하여 예측될 수 있다.

[0135] [수학식 14]

$$BGBMC = \frac{BMR \times BMD}{BGR \times BGD}$$

[0136]

[0137] [수학식 15]

$$\sum_{b2} total_x_{b2,sc} \leq BGBMC \times \sum_{b1} \sum_g x_{b1,g}$$

[0138]

[0139] 하기 수학식 16에서와 같이, 바이오메탄의 kg 당 요구되는 에너지량은 기준으로 AT 내에서의 전기 소비(EER^{MEA}) 및 열 에너지(HER^{MEA}), 에너지 단위 전환율(EC^{kWh_MJ}) 및 바이오메탄의 발열 값($BMHV$)을 이용하여 명확하게 계산될 수 있다. 또한, 전체 바이오메탄의 생산을 위한 총 에너지 소비(E_z^{MEA}) 및 재사용되는 바이오메탄 유속은 하기 수학식 17 및 18에 의하여 결정된다.

[0140] [수학식 16]

$$ER^{MEA} = (EER^{MEA} + HER^{MEA}) \times EC^{kWh_MJ} \times BMHV$$

[0141]

[0142] [수학식 17]

$$E_z^{MEA} = ER^{MEA} \times \sum_{b2} total_x_{b2,sc}$$

[0143]

[0144] [수학식 18]

$$\sum_{b2'} x_{b2',sc} \geq \frac{E_z^{MEA}}{MEC}$$

[0145]

[0146] 수소 생산을 위한 SMR 공정

[0147] 하기 수학식 19 및 도 4f에 나타낸 바와 같이, 수소의 발생량($HBMC$)은 SMR 기준(reference) 내 메탄에 대한 수소의 비에 의하여 간단히 계산될 수 있다.

[0148] [수학식 19]

$$\sum_h x_{h,sc} \leq \frac{\sum_{b2} x_{b2,sc}}{HBMC}$$

[0149]

[0150] SMR에서 소비되는 에너지의 양은 참고 문헌(reference)에 의하여 계산되며 병합 발전 플랜트(combined cycle power plant)로부터 에너지를 충당하는 것으로 가정할 수 있다. 세부 고려사항은 총 환경 비용 섹션에서 설명하기로 한다.

[0151] B. IHSN의 다목적 함수

[0152] 일 구체예에 따르면, 하기 수학식 20에서와 같이 목적함수는 총 경제적 비용(total annual cost; TAC)과 총 환경 비용(total environmental cost; TEC)을 최소화하면서 최적의 해를 찾는 것이다.

[0153] [수학식 20]

$$\text{Min. } TAC = \text{Total Annual Cost}$$

$$\text{Min. } TEC = \text{Total Environmental Cost}$$

[0155] TAC은 설비 투자비용, 설비 운전 비용 및 수소 구입 비용의 서브-항목(sub-term)에 근거를 둔다. 가능한 타협안(compromise)을 제시할 수 있는 ε -구속조건법이 균형 잡힌 해를 도출하는데 사용된다. ε -구속조건법을 적용한 후에, 하나의 세트의 파레토 최적 해가 개별 목적 함수의 축(axes)에 기반하여 도출되고, 그 결과는 의사결정자에게 실현 가능한 전략을 제안할 수 있다.

[0156] 본 구체예에 따르면, 개별 목적 함수는 수소 수요량의 불확실성을 반영하기 위하여 2 단계로 구분될 수 있다. 다목적 함수 내 경제적 비용으로서 TAC을 사용할 경우(하기 수학식 21 참조), 제1 단계(TAC^{first})는 AD 공정(설비 또는 자본 비용($ACC_{s,g}$) 및 운전 비용($AOC_{s,g}$) 및 운송 모드(파이프라인 설치 비용($PCC_{bl,g}$) 및 파이프라인 운전 비용($POC_{bl,g}$), 압축기 설치 비용($CCC_{bl,g}$) 및 압축기 운전 비용($COC_{bl,g}$))을 포함하는 바, 이는 수소 생산과는 간접적으로 관련된 것이다(수학식 22 참조).

[0157] [수학식 21]

$$TAC = TAC^{first} + TAC^{second}$$

[0159] [수학식 22]

$$TAC^{first} = \sum_s \sum_g ACC_{s,g} + \sum_s \sum_g AOC_{s,g} + \sum_{bl} \sum_g PCC_{bl,g} + \sum_{bl} \sum_g POC_{bl,g} + \sum_{bl} \sum_g CCC_{bl,g} + \sum_{bl} \sum_g COC_{bl,g}$$

[0160]

[0161] 제2 단계는 수소 생산과 직접적으로 관련된 것으로, 기존의 수소 공급 망의 운영 시 수소 구매 비용(HPC_{hx}), AT(설치 또는 투자 비용($MCC_{bz,x}$) 및 운전 비용($MOC_{bz,x}$)), 및 SMR(설치 또는 투자 비용(SCC_{hx}) 및 운전 비용(SOC_{hx}))을 포함한다(수학식 23 참조).

[0162] [수학식 23]

$$TAC^{second} = \zeta \times \sum_x \left[\sum_h HPC_{hx} + \sum_{bz} (MCC_{bz,x} + MOC_{bz,x}) + \sum_h (SCC_{hx} + SOC_{hx}) \right]$$

[0163]

[0164] 이와 관련하여, 기존 수소 공급 망에서 운영되고 있는 SMR에 대한 설치 및 운영 비용은 제외되며, 또한 폐수처리 플랜트(WWTP)에 관한 비용 역시 고려하지 않는 바, 이는 WWTP의 경우에 이미 존재하고 운영 중에 있기 때문이다.

[0165] 수학식 24에 나타난 바와 같이, 다목적 함수 내 환경 비용으로 TEC을 사용할 경우, 제1 단계(TEC^{first})은 NGHSN 내에서의 NG 추출($NEEC_h$) 및 S2BHSN 내에서의 압축기 에너지($CEC_{bl,g}$)에 대한 환경적 영향을 받는다(수학식 25 참조).

[0166] [수학식 24]

$$[0167] \quad TEC = TEC^{first} + TEC^{second}$$

[0168] [수학식 25]

$$[0169] \quad TEC^{first} = \sum_h NEEC_h + \sum_{bl} \sum_g CEC_{bl,g}$$

[0170] 또한, 제2 단계(TR^{second})는 기존의 수소 공급 망 운영 시 사용되는 NGHSN 내 SMR 에너지($ESEC_{h,x}$) 및 본 구체예에서 제시되는 수소 공급 망 운영 시 사용되는 S2BHSN 내 장래의 SMR 에너지($PSEC_{h,x}$)에 대한 환경 영향을 받는다(수학식 26 참조).

[0171] [수학식 26]

$$[0172] \quad TEC^{second} = \zeta \times \sum_{sc} \sum_h (ESEC_{h,sc} + PSEC_{h,sc})$$

[0173] IHSN 내 전체 연비용(TAC)

[0174] 설비 투자 비용(Facility capital cost)

[0175] AD 공정, 압축기 및 AT 각각에 대한 설치 또는 투자 비용($ACC_{i,g}$, $CCC_{bl,g}$, 및 $MCC_{b2,sc}$)는 참고 문헌에 따른 비선형 식으로 기술할 수 있다. 모든 구축조건을 선형 계획화하기 위하여 간단한 비선형 근사법을 이용할 수 있다.

[0176] AD 공정의 설치 비용은 슬러지 유속, 기준 용량($ADCap$), 기준 초기 설치 비용(C_0^{AD}), 및 통화 환산(currency conversion) 비(CC)에 의하여 결정된다(수학식 27). 압축기 설치 비용(capital cost)은 운송 과정에 필요한 기준 에너지로부터의 에너지 소비($ER^{compressor}$) 및 기준 초기 설치 비용($C_0^{compressor}$)에 의하여 계산된다(수학식 28). AT 설치 비용은 전체 바이오메탄 생산량, 바이오메탄 내 이산화탄소 비($CDRBM$), 포획 효율(CE), 기준으로부터의 탄소 포획율($CCRR$) 및 기준 초기 설치 비용(C_0^{MEA})에 의하여 결정된다(수학식 29). 파이프라인 설치 비용은 단위 설치 비용($C^{pipeline}$), WWTP-AD 및 수소 수요 지역(구체적으로, PCI)을 포함하는 영역 간의 거리($Dist_{bl,g}$) 및 WWTP의 이항 변수에 의하여 영향을 받는다(수학식 30). 이외에도, 모든 설비의 건설은 설치 비용 인자(CF)에 의하여 불가피하게 영향을 받게 된다.

[0177] [수학식 27]

$$[0178] \quad ACC_{i,g} = \frac{C_0^{AD} \times \left(\frac{x_{i,g}}{ADCap} \right) \times CC}{CF}$$

[0179] [수학식 28]

$$[0180] \quad CCC_{bl,g} = \frac{C_0^{compressor} \times \left(\frac{ER_{bl,g}^{compressor}}{ER^{compressor}} \right)}{CF}$$

[0181] [수학식 29]

$$[0182] \quad MCC_{b2,sc} = \frac{C_0^{MEA} \times \left(\frac{total_x_{b2,sc} \times CDRBM \times CE}{CCRR} \right)}{CF}$$

[0183] [수학식 30]

$$PCC_{bl,g} = \frac{C_{pipe}^{line} \times Dist_{bl,g} \times b_g^{WTP}}{CF}$$

[0184]

[0185] SMR 설치 비용은 자본 설비 비용(capital equipment charge; CEC), 바이오메탄 가격에 따른 수소 생산 비용(HBM), S2BHSN 내의 수소 유속 및 년 당 운전 일수(OD)에 의하여 계산된다(수학식 31). 수소 생산 비용은 바이오메탄 가격(BM_price)에 의하여 결정되고(수학식 32), 바이오메탄 가격은 바이오메탄 생산의 근거가 되는 설비의 투자 및 운전 비용($FCOC^{AD_MEA}$), 단위 바이오메탄 당 전기 소비량(MEC), 바이오메탄 유속(BMF) 및 에너지 단위 전환율(EC^{MEW_kWh})에 의하여 얻을 수 있다(수학식 33).

[0186] [수학식 31]

$$SCC_{h,z} = CEC \times HBM \times x2_{h,z} \times OD$$

[0187]

[0188] [수학식 32]

$$HBM = 0.286 \times BM_price + 0.15$$

[0189]

[0190] [수학식 33]

$$BM_price = \frac{FCOC^{AD_MEA}}{MEC \times BMF} \times EC^{MEW_kWh}$$

[0191]

[0192] 설비 운전 비용(Facility operating cost)

[0193] 운전 비용은 기본적으로 물질의 유속 또는 설치 비용에 비례한다. AD 공정의 운전 비용($AOC_{s,g}$)은 슬러지의 톤 당 단위 운전 비용(O_0^{AD}), 슬러지 유속 및 통화 환산율에 의하여 계산된다(수학식 34). 압축기의 운전 비용($COC_{bl,g}$), 파이프라인 운전 비용($POC_{bl,g}$) 및 AT 운전 비용($MOC_{s2,sc}$)은 이의 자본 비용 및 상기 자본 비용의 비율(각각 $FC^{compressor}$, $FC^{pipeline}$, 및 FC^{MEA})에 의하여 결정된다(수학식 35 내지 37). SMR 운전 비용은 운전 및 유지 비용(OMC), 바이오메탄 가격에 따른 수소 생산 비용, S2BHSN 내 수소 유속 및 년 당 운전일수에 의하여 결정된다(수학식 38).

[0194] [수학식 34]

$$AOC_{s,g} = O_0^{AD} \times x_{s,g} \times CC$$

[0195]

[0196] [수학식 35]

$$COC_{bl,g} = FC^{compressor} \times CCC_{bl,g}$$

[0197]

[0198] [수학식 36]

$$POC_{bl,g} = FC^{pipeline} \times PCC_{bl,g}$$

[0199]

[0200] [수학식 37]

$$MOC_{s2,sc} = FC^{MEA} \times MCC_{s2,sc}$$

[0201]

[0202] [수학식 38]

$$SOC_{h,z} = OMC \times HBM \times x2_{h,z} \times OD$$

[0203]

- [0204] NGHSN 내에서의 수소 구입
- [0205] 수소 구입은 기존의 수소 공급 망(NGHSN) 내에서 일어나고, 전체 수소 구입 가격($HPC_{h,sc}$)은 천연가스(NG) 가격을 통하여 유도된 수소 생산 가격의 식(HNG)에 의존한다(수학식 39 및 40).
- [0206] [수학식 39]
- [0207]
$$HPC_{h,sc} = HNG \times x_{I_{h,sc}} \times OD$$
- [0208] [수학식 40]
- [0209]
$$HNG = 0.286 \times NG_price + 0.15$$
- [0210] IHSN의 총 환경 비용
- [0211] 일 구체예에 따른 모델에 있어서, 환경 비용의 경우, 온실 가스(GHG)와 관련하여 하기의 4가지 측면과 명확한 관련성이 있다: 1) 기존 수소 공급 망(NGHSN) 내 SMR 공정을 위한 원료 물질로서 천연가스(NG)를 사용하기에 앞서 수행하는 NG 추출 공정, 2) 기존 수소 공급 망(NGHSN) 내 SMR 공정에서 사용하는 에너지, 3) S2BHSN 내 운송 모드를 위한 압축기 운전, 및 4) 장래의 S2BHSN 내 SMR 공정에서 소비되는 에너지.
- [0212] NG의 GHG 배출량(GES)은 NG의 발열 값($NGHV$) 및 NGd 추출에 대한 글로벌 온난화 포텐셜 스코어($GWPNG$)를 이용하여 계산된다(수학식 41). 이는 NGHSN가 NG를 필요로 할 경우에 NG의 잠재적인 환경 비용을 유발하게 된다(수학식 42). 현재 NGHSN 내에서 운전되고 있는 기존 SMR 공정에 대한 환경 비용($ESEC_{h,sc}$) 및 S2BHSN에서 부가될 것으로 예상되는 장래의 SMR 공정에 대한 환경 비용($PSEC_{h,sc}$)은 화석 연료에 따른 단위 전기의 GHG 배출 스코어($GECP$ 및 $GEGP$), 단위 수소 생산 당 요구되는 전기량(ECS) 및 수소 유속에 의하여 결정된다(수학식 43 및 44). 압축기의 환경 비용($CEC_{bl,g}$)은 화석 연료에 따른 단위 전기의 GHG 배출 스코어 및 압축기 내 에너지 소비에 의하여 결정된다(수학식 45).
- [0213] [수학식 41]
- [0214]
$$GES = NGHV \times GWPNG$$
- [0215] [수학식 42]
- [0216]
$$NEEC_{\hat{h}} = GES \times x_{NG_{\hat{h}}}$$
- [0217] [수학식 43]
- [0218]
$$ESEC_{h,sc} = GECP \times ECS \times x_{I_{h,sc}}$$
- [0219] [수학식 44]
- [0220]
$$PSEC_{h,sc} = GEGP \times ECS \times x_{2_{h,sc}}$$
- [0221] [수학식 45]
- [0222]
$$CEC_{bl,g} = GEGP \times \sum_{bl} \sum_{\varepsilon} E_{bl,\varepsilon}^{COMPRESSOR}$$
- [0223] B. 케이스 연구
- [0224] 대한민국 경상도 지역 대상으로 케이스 연구를 수행하였다. 해당 지역에는 대규모의 석유화학 단지 및 대형 도시가 분포되어 있는 바, 지역별 데이터 및 데이터 출처, 수소 수요지(PCI)과 지역 간 거리 산출, 수소 수요지에서 사용 중인 총 수소 수요량 산출, 다수의 ε -값을 기준으로 파레토(Pareto) 세트를 선정하여 파레토 분석을

수행한다.

[0225] 선택적으로, 파레토 분석 이후에는 핀치 분석을 통하여 기존의 수소 공급 망의 단독 운영, 일 구체예에서 제시된 모델의 스텝 별 환경 비용 분석, 그리고 핀치 분석을 기반으로 하여 신재생 에너지 시스템(renewable energy system)의 도입 여부에 따른 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였다.

[0226] 이와 관련하여, 경상도 지역으로부터의 폐수처리 플랜트(WWTP) 데이터를 표 2에 나타내었다.

표 2

	지역 명	폐수 원 (10^6 kg/day)	PCI까지 거리 (km)
1	부산	2,082	50
2	대구	1,862	110
3	울산	592	10
4	포항	269	80
5	경주	146	55
6	김천	80	170
7	안동	57	180
8	구미	453	165
9	영주	40	200
10	영천	35	85
11	상주	26	180
12	문경	40	200
13	경산	40	95
14	의성	8	145
15	청송	8	140
16	영덕	18	125
17	청도	10	80
18	고령	11	145
19	성주	5	145
20	칠곡	62	140
21	예천	8	200
22	울진	12	195
23	창원	25	85
24	마산	500	95
25	진주	158	145
26	진해	60	87
27	통영	54	185
28	사천	68	160
29	김해	227	65
30	거제	41	190
31	양산	167	35
32	의령	5	127
33	함안	7	105
34	창녕	24	115
35	고성	11	135
36	남해	7	235
37	하동	9	225
38	산청	8	195
39	함양	7	215
40	거창	19	207
41	합천	5	165
42	밀양	38	75

[0227]

[0228] 또한, 케이스 연구를 위한 파라미터 및 데이터를 하기 표 3에 나타내었다.

표 3

N2BHSN	WWTP-AD	ADCap	43.75
		BGD	1.2
		BGR ^{AD}	2,686.257
		C ₀ ^{AD}	5.875
		E ^{BSM1}	3,969
		E ^{BSM2}	9,389
		MD	0.656
		MEC	13.89
		MRBG	0.57
		O ₀ ^{AD}	9.52
		SD	34
		SD	178.471
		WWD	1000
		WWR	20,641.768
	수송	C ^{pipeline}	45,000
		C ₀ ^{compressor}	15,000
		ER ^{compressor}	10
		EU	0.7
		FC ^{compressor}	0.04
		FC ^{pipeline}	0.05
	AT-SMR	BGR	95
		BMD	0.74
		BMF	519
		BMHV	50
		BMR	46
		C ₀ ^{AD}	5.875
		C ₀ ^{MEA}	134,400,000
		CCRR	2,493,151
		CDRBM	0.3
		CE	0.9
		CEC	0.28
		EER ^{MEA}	0.0136
		FC ^{MEA}	0.44
		FCOC ^{AD, MEA}	541.23
		GEGP	0.35
		HBMC	3
		HER ^{MEA}	0.1029
		OMC	0.17
NGHSN		ECS	51.3
		GECP	0.75
		GWPNG	30.4
		HNGC	3
		NGHV	54
		NG_price	13.2
잉여 파라미터		CC	1.12
		CF	30
		EC ^{kW_h, MJ}	0.28
		EC ^{Adm_h, kWh}	293.3
		OD	365
		ζ	0.01

[0229]

[0230]

본 케이스 연구에 따르면, 경상도는 5개의 행정 구역, 구체적으로 경북, 경남, 그리고 3개의 광역시로 구분되며, 본 케이스 연구에 적용하여 IHSN 모델을 평가하였다. 이는 대규모의 수소 수요처(구체적으로, 석유 화학 산업(PCI) 설비)가 울산 내에 위치하고, 많은 다른 사이즈의 도시가 울산 근처에 위치하고 있기 때문이다.

[0231]

지역 별 폐수 량은 한국 환경 주식회사로부터 참조하였고, 개별 지역과 수소 수요처(구체적으로 PCI) 간 거리는 근사하였다(상기 도 2 참조). 울산 석유화학 단지 내 수소 수요량은 자체 수소 원 및 외부 수소 원에 의하여 공급된다. 외부 수소 공급원으로부터의 수소 수요량은 한국 에너지 공단(Korea Energy Agency.) 내 신재생 에너지 센터에 따라 예측하였다.

[0232]

케이스 연구용 고유 파라미터(상기 표 3 참조)를 이용하여 제안된 수학적 모델의 해를 구한 후, 페레토 세트에 기초하여 파레토 분석을 수행하였다.

[0233]

추가적으로, HCH 핀치 분석을 수행하여 환경 비용에 있어서 기존의 HSN과 본 개시 내용에서 제안된 IHSN을 비교하고 분석하였다. HCH 핀치 분석에 따라, 재생가능한 에너지 시스템을 고려하는 방식으로 민감도 분석을 수행

하였다.

[0234] C. 결과 및 토의

[0235] 본 케이스 연구에 대한 파레토 분석

[0236] 도 5에서 케이스 연구의 TAC 및 TEC의 파레토 그래프를 나타내었다. 상기 도면을 참조하면, 베이스 케이스 (Base case)를 포함한 총 11개의 파레토 세트를 추출하였고, 포인트 별 TEC 감소 비율 vs TAC 증가 비율을 제시 하였다.

[0237] 상기 도면에 따르면, 바이오 포텐셜과 지역 간 거리가 함께 영향을 미침을 알 수 있다. 포인트 간 TEC 및 TAC 에 있어서 증가 및 감소 비를 하기 표 4에 나타내었다.

표 4

지점	TEC 증가 (%)				TAC 감소 (%)			
	TEC 감소 (%)			D	TAC 증가 (%)			D
	A	B	C		A	B	C	
A		2.94	10.29	39.51		18.25	19.94	27.64
B	2.86		7.14	35.63	15.28		7.71	16.47
C	9.88	6.66		26.49	24.91	8.85		9.80
D	28.82	26.21	20.94		38.01	19.72	10.49	

[0238]

[0239] 베이스 케이스 D와 비교하면, 케이스 B 및 C는 TEC의 감소 또는 증가의 절대 값이 TAC의 증가 또는 감소의 절대 값에 비하여 크다는 점을 시사한다. 이와 달리, 케이스 A의 경우, 베이스 케이스 D와 비교하면 보다 많은 비용을 소모하여 TEC를 감소시킨다. 도 6에 도시된 바와 같이, IHSN의 S2BHSN 내에서 선택된 WWTP-AD 영역은 파레토 세트 내의 케이스에 따라 상이한 망 구조를 도시한다. S2BHSN 구조는 기본적으로 지역 바이오가스 포텐셜 및 개별 지역과 수소 수요처(PCI) 간 거리에 의하여 영향을 받는다. 케이스 A의 경우, ε-구속요건 (constraint)을 유지하기 위하여 불가피하게 먼 거리의 WWTP를 이용하는 결과를 보여준다. 도 5에 나타낸 바와 같이, 케이스 B(경사가 명확히 변화하기 시작하는 지점)는 환경 비용(TEC)을 나누기 위하여 근처의 대규모 WWTP 시설 이용은 물론, 중장거리의 WWTP 지역도 채택한다. 케이스 C의 경우(TAC이 증가하는 것보다 TEC이 더 감소 하는 포인트), 근처의 가장 큰 대규모 WWTP 시설(부산, 대구 및 울산) 및 인접한 몇몇 중소규모의 WWTP 시설을 이용하고 있다. 모든 케이스의 TAC 및 TEC 결과는 하기 표 5에서와 같이 주된 요소로 분할될 수 있다.

표 5

지점	TAC (10 ⁶ US\$/yr)					
	THP	FCC	TCC	FOC	TOC	Total
A	71.6	43.0	66.6	31.9	3.1	216.1
B	78.0	39.8	38.5	29.5	1.7	187.5
C	93.8	31.8	22.9	23.6	1.0	173.0
D	156.6					156.6

	GHG 배출량(10 ⁶ kg CO ₂ eq/day)				H ₂ 수요량(10 ⁶ kg/day)		
	NG 추출	SMR ^A	SMR ^B	운송	총합	소스 ^A	소스 ^B
A	246.2	1,923.7	1,064.7	165.4	3,400.0	50.0	59.3
B	268.0	2,093.5	985.5	153.1	3,500.0	54.1	54.9
C	322.3	2,518.0	787.4	122.3	3,750.0	65.4	43.9
D	538.3	4,205.2			4,743.5	109.3	

A: NGHNS
B: S2BHSN

[0240]

[0241]

[0242] 케이스 연구용 하이브리드 탄소-수소 펀치 분석

[0243] 수소 수요량과 관련하여, 기존의 수소 공급 망(HSN) 및 통합된 수소 공급 망(IHSN)의 비교는 HCH 펀치 분석에 의하여 보고된다. 이와 관련하여, 도 7a는 수소 수요 및 TEC의 HCH 펀치 분석 결과를 나타내는 그래프이고, 도 7b는 섹션 간 TEC를 대비한 결과를 보여준다.

- [0244] 도 7a를 참조하면, 케이스 B(파레토 분석에 따르면 상대적으로 적합한 해에 상당함)를 HCH 핀치 분석에 적용하였다. 수소 수요량은 2가지 상(phase)으로 구분되는 바, 이는 IHSN 내 S2BHSN이 최대 수소 생산능을 갖고 있기 때문이다. 따라서, 본 케이스 연구에 있어서, S2BHSN 내에서의 총 수소 생산능은 일 당 약 61톤 미만이다. 4개의 다른 섹션이 서로 연결되어 S2BHSN을 기술한다. 섹션 I1 및 I2는 S2BHSN과 관련이 있고, 섹션 I3 및 I4는 NGHSN과 관련이 있는 바(도 7b 참조), 압축기 내 에너지 소비를 나타낸다. 또한, NG 추출 공정을 나타내는 I3는 수직선으로 표시되는 바, 이는 압축기 운전 및 NG 처리가 수소 수용량에 직접적으로 영향을 주지는 않지만, 대신에 GHG 배출을 생성하여 TEC의 증가를 초래하기 때문이다. 섹션 I2(장래의 SMR 공정을 포함함)는 NG 병합 사이클 발전 플랜트로부터의 에너지를 이용함으로써 운전되는 것으로 가정하며, 섹션 I4(기존 SMR 공정을 포함함)는 현재 ICGCC(integrated coal gasification combined cycle power plants) 또는 분쇄된 석탄 화력 플랜트로부터의 에너지에 의하여 운전된다.
- [0245] 결국, 섹션 I2 및 I4는 수소 수요량에 대한 TEC의 비에 의존하는 라인 경사를 갖는다. 기존의 HSN(점선으로 표시됨)는 오직 2개의 섹션, 즉 NG 추출 공정 및 기존의 SMR 운전으로 구성된다. IHSN은 핀치 포인트가 현 상황보다 훨씬 적다는 점을 지시한다.
- [0246] 풍력 발전에 관한 HSN의 민감도 분석
- [0247] IHSN 모델 내 모든 SMR 공정은 경제적 이유로 화석 연료에 기반하여 다량의 에너지를 이용한다. 그러나, 에너지를 이용하기 위하여 화석연료를 연소하는 것은 글로벌 온난화 문제로 인하여 지속적인 제한이 가해지고 있다. 신재생 에너지(신재생 소스로부터 수집됨)는 현재 화석 연료를 대체하고 있으며, 신재생 에너지의 적용 및 연구의 성장은 전세계에 걸쳐 가속화되고 있다. 따라서, HCH 핀치 그래프의 핀치 포인트는 적당한 신재생 에너지 시스템을 고려함으로써 하측 방향으로 이동될 수 있다. 국내에서는 다양한 풍력발전 설비가 운영 중에 있는 바, 국내 전체 풍력 용량의 23% 이상이 경상도 지역에 집중되어 있다. 대규모의 풍력 용량을 갖는 4개의 지역을 통합하여 현재의 에너지 시스템을 변경하였고(도 8a 참조), 상기 결과는 핀치 포인트가 IHSN과 대비하면 약 25.2%까지 감소함을 보여준다(도 8b 참조). 즉, 신재생 에너지(예를 들면, 풍력)를 고려할 경우, 핀치 포인트를 추가적으로 내릴 수 있는 것이다. 풍력 에너지가 신재생 에너지이기는 하나, GHG 배출은 운전 중에 불가피하게 배출된다. 그러나, 풍력에 대한 GHG 배출 스코어 값은 매우 작기 때문에 이러한 경향은 거의 바뀌지 않는다(0.012 kg CO₂ eq/kWh).
- [0248]
- [0249] D. 결론
- [0250] 본 구체예에서는 수소 수요량 불확실성 하에서 NGHSN 및 S2BHSN을 동시에 최적화함으로써 IHSN을 개발하기 위한 의사 결정 알고리즘을 제공한다. 기존 수소 공급 망인 NGHSN이 감소된 회계 비용의 장점 및 간단한 공급 체인 구조를 갖고 있음에도 불구하고, GHG 배출과 관련한 환경 문제를 유발하고 있다. 따라서, 생물학적 기반의 HSN으로서 S2BHSN이 설계되어 환경 비용을 고려하도록 통합된다. 또한, 많은 WWTP가 환경 측면의 고려 여하에 따라 운전될 수 있기 때문에 대량의 공급원료가 소모되어 왔다. 본 구체예에서 제안된 모델은 2개의 목적 함수(TAC 및 TEC)를 최소화하는 MOTSSMILP 모델로 구현되고, 수소 수요량의 불확실성을 다루기 위하여 결정론적 및 추계론적 단계를 분리한다.
- [0251] 또한, 경상도 지역에 대한 케이스 연구를 통하여 본 구체예에서 제안된 모델을 평가하였다. 구체적으로, ϵ -구속조건법(ϵ -constraints)을 통하여 파레토 분석을 수행하였는 바, 베이스 케이스를 포함하는 총 4개의 포인트가 선정되었으며, 베이스 케이스와 대비한 TAC 및 TEC의 증가/감소를 산출하였으며, 세부적인 IHSN 구조를 지도 상에 도시하였다. 케이스 B가 핀치 분석을 위한 잠재적인 케이스로 선택되어 수소 수요량에 따른 개별 TEC를 검사하였고, 해당 결과는 TEC가 약 26.2%까지 감소함을 보여준다. 최종적으로, 신재생 에너지의 영향을 나타내기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 경상도 지역 내에 위치하는 풍력 발전 설비를 채택하였는 바, TEC는 추가적으로 약 25.2%까지 감소하였다.
- [0252] 그 결과, 본 발명자들은 도출된 모델의 유효성을 평가하였고, S2BHSN의 건설에 있어서 환경 문제에 관한 문제를 갖고 있는 기존의 수소 공급 망(HSN)을 변경할 필요가 있음을 확인하였다. 또한, 본 구체예에 따른 결과는 수소 경제 또는 수소 연료 스테이션과 관련한 장래의 수소 공급 망까지 확장될 수 있다는 점에서 유리하다.
- [0253] 본 명세서에서 사용되는 세트(set)는 하기 표 6, 파라미터는 하기 표 7 및 8, 그리고 변수 및 이항 변수는 하기 표 9 및 10과 같이 정의된다.

표 6

세트

w : 폐수
 s : 슬러지
 $b1$: 바이오가스
 $b2$: 바이오메탄
 h : 수소
 p : 파이프라인 운송 모드
 c : 압축기
 g : 지리적 영역(geographical region)
 sc : 시나리오

[0254]

표 7

파라미터

$ADCap$: AD 용량 (10^5 tons/yr)
 $BGBMC$: 바이오가스의 바이오메탄으로의 전환 인자 (kg of biomethane/ kg of biogas)
 BGD : 바이오가스 밀도 (kg/m^3)
 BGR : 바이오가스 기준 유속 (m^3/day)
 BGR^{AD} : AD로부터의 바이오가스 기준 유속 (m^3/day)
 BMD : 바이오메탄 밀도 (kg/m^3)
 BMF : 바이오메탄 유속 (kg/day)
 $BMHV$: 바이오메탄 발열 값 (MJ/kg)
 BMR : 바이오메탄 기준 유속 (m^3/day)
 BM_price : 바이오메탄 가격 AD-MEA (US\$/MMBtu)
 $C_{pipeline}^{pipe}$: 단위 파이프라인 설치 비용 (US\$/km)
 C_0^{AD} : 초기 AD 설치 비용 (10^6 €)
 $C_0^{compressor}$: 초기 압축기 비용 (US\$)
 C_0^{MEA} : 초기 MEA 설치 비용 (US\$/yr)
 CC : 통화 전환율 (US\$/€)
 $CCRR$: 탄소 포획율 기준 (kg/day)
 $CDRBM$: 바이오메탄 내 이산화탄소 비
 CE : 포획 효율
 CEC : 자본 설비 비용(capital equipment charge)
 CF : 자본 비용 인자(capital charge factor)
 $Dist_{bl,g}$: 지역 내 AD와 PCI 내 MEA 간 거리 (km)
 E^{BSM1} : BSM1에서 에너지 소비량 (kWh/day)
 E^{BSM2} : BSM2에서 에너지 소비량 (kWh/day)
 EC^{kWh_MJ} : 에너지 전환율 (kWh/MJ)
 EC^{MMBtu_kWh} : 에너지 전환율 ($kWh/MMBtu$)
 ECS : SMR 내 에너지 소비량 (kWh/kg of H_2)

[0255]

표 8

파라미터

EER^{MEA}	: 전기에너지 기준 순 소비량 (kWh/kWh biomethane output)
$ER^{compressor}$	: 압축기 내 에너지 기준 소비량 (kW)
ER^{MEA}	: 에너지 기준 순 소비량 (kWh/kg of biomethane)
$ER^{WWTP-AD}$	: 에너지 기준 순 소비량 (kWh/day)
EU	: 에너지 이용량 (kWh/kg)
$FC^{compressor}$	: 압축기 설치 비용 분율
FC^{MEA}	: MEA 설치 비용 분율
$FC^{pipeline}$	: 파이프라인 설치 비용 분율
$FCOC^{AD,MEA}$	: 바이오메탄 생산용 설비 투자 및 운전 비용 (US\$/day)
GES	: 온실가스 배출 스코어 (kg CO ₂ eq/kg of NG)
$GECP$	: 석탄화력 플랜트로부터 배출되는 온실가스 (CO ₂ eq kg/kWh)
$GEGP$	: 가스 병합 발전 플랜트로부터 배출되는 온실가스 (CO ₂ eq kg/kWh)
$GWPNG$	: NG 추출에 대한 글로벌 온난화 포텐셜 (grams of CO ₂ eq/MJ)
HBM	: 바이오메탄으로부터의 수소 생산 비용 (US\$/kg)
$HBMC$	: 수소에서 바이오메탄으로의 전환 인자 (kg of biomethane/kg of hydrogen)
HDP_{sc}	: 석유화학 산업 내 수소 수요량 (kg/day)
HER^{MEA}	: 열 에너지 기준 순 소비량 (kWh/kWh biomethane output)
HNG	: NG로부터의 수소 생산 비용 (US\$/kg)
$HNGC$	: 수소에서 NG로의 전환 인자 (kg of NG/kg of hydrogen)
MD	: 메탄 밀도 (kg/m ³)
MEC	: 메탄으로부터 전기로의 전환율 (kWh/kg of methane)
$MRBG$	: 바이오가스 내 메탄 비 (m ³ of methane/ m ³ of biogas)
$NBGE$	: 기준 내 에너지 소비에 필요한 바이오가스 (m ³ /day)
$NGHV$	: NG 발열 값 (MJ/kg)
NG_price	: NG 가격 (US\$/MMBtu)
O_0^{AD}	: AD 운전 비용 (€/ton)
OD	: 운전 일수 (day/yr)
OMC	: 운전 및 유지 비용
SD	: 슬러지 밀도 (kg/m ³)
SR	: 슬러지 기준 유속 (m ³ /day)
$SRBGC$	: 슬러지에서 재사용되는 바이오가스로의 전환 인자 (kg of biogas/kg of sludge)
$STBGC$	: 슬러지에서 생성되는 총 바이오가스의 전환 인자 (kg of biogas/kg of sludge)
WWD	: 폐수 밀도 (kg/m ³)
$WWFR_{w,g}$	: 폐수 유속 (kg/day)
$WWSC$	: 폐수에서 슬러지로의 전환 인자 (kg of sludge/kg of wastewater)
WWR	: 폐수 기준 유속 (m ³ /day)
ζ'	: 확률

[0256]

표 9

변수

$ACC_{s,g}$	: AD 설치 비용 (US\$/yr)
$AOC_{s,g}$	: AD 운전 비용 (US\$/yr)
$CCC_{bl,g}$	: 압축기 설치 비용 (US\$/yr)
$CEC_{bl,g}$	: 압축기 환경 비용 (kg CO ₂ eq /day)
$COC_{bl,g}$	: 압축기 운전 비용 (US\$/yr)
$E_{bl,g}^{compressor}$	: 압축기 내 에너지 소비량 (kWh)
E_{sc}^{MEA}	: MEA 내 에너지 소비량 (kWh/day)
$ESEC_{h,sc}$	: 기존 SMR의 환경 비용 (kg CO ₂ eq /day)
$HPC_{h,sc}$	: 수소 구입 비용 (US\$/yr)
$MCC_{b2,sc}$	: MEA 설치 비용 (US\$/yr)
$MOC_{b2,sc}$	: MEA 운전 비용 (US\$/yr)
$NEEC_h$	: NG 추출 환경 비용 (kg CO ₂ eq /day)
$PCC_{bl,g}$	: 파이프라인 설치 비용 (US\$/yr)
$POC_{bl,g}$	: 파이프라인 운전 비용 (US\$/yr)
$PSEC_{h,sc}$	: 예측된 SMR 환경 비용 (kg CO ₂ eq /day)
$SCC_{h,sc}$	: SMR 설치 비용 (US\$/yr)
$SOC_{h,sc}$	: SMR 운전 비용 (US\$/yr)
TAC	: 총 경제적 비용(total annual cost; US\$/yr)
TAC^{first}	: 제1 단계에서의 총 경제적 비용 (US\$/yr)
TAC^{second}	: 제2 단계에서의 총 경제적 비용 (US\$/yr)
TEC	: 총 환경 비용 (kg CO ₂ eq /day)
TEC^{first}	: 제1 단계에서의 총 환경 비용 (kg CO ₂ eq /day)
TEC^{second}	: 제2 단계에서의 총 환경 비용 (kg CO ₂ eq /day)
$total_x_{bl,g}$	: AD로부터 생성된 총 바이오가스 (kg/day)
$total_x_{b2,sc}$	: 생성된 총 바이오메탄 유속 (kg/day)
$x_{bl,g}$	: AD로부터 운송 모드까지의 바이오가스 유속 (kg/day)
$x_{bl',g}$	: AD 및 AD 부속 설비의 에너지를 충족하기 위한 바이오가스 유속 (kg/day)
$x_{b2,sc}$	: MEA로부터 SMR까지의 바이오메탄 유속 (kg/day)
$x_{b2',sc}$	: MEA 및 MEA 부속 설비의 에너지를 충족하기 위한 바이오메탄 유속 (kg/day)
$x_{s,g}$	: 슬러지 유속 (kg/day)
$xI_{h,sc}$	: NG로부터의 수소 생산 유속 (kg/day)
$x2_{h,sc}$	: 바이오메탄으로부터의 수소 생산 유속 (kg/day)
x_NG_h	: NG 유속 (kg/day)

[0257]

표 10

이항 변수(Binary variable)

b_{ξ}^{WWTP} : WWTP가 채택되는지 여부

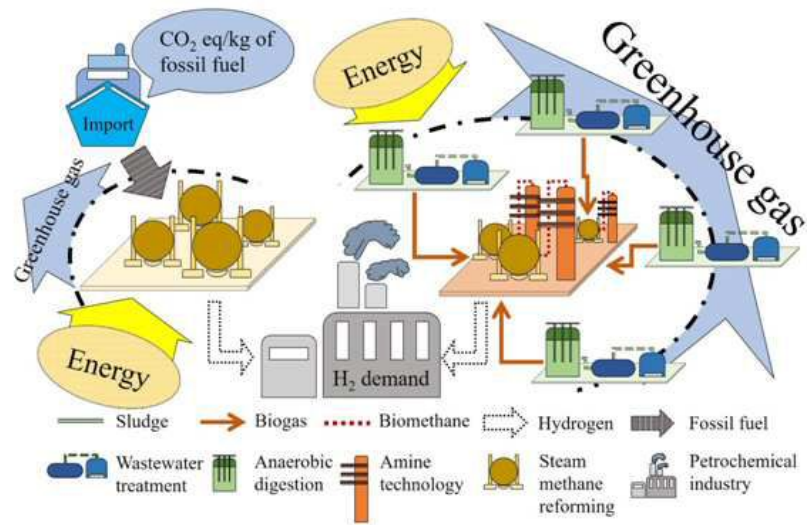
[0258]

[0259]

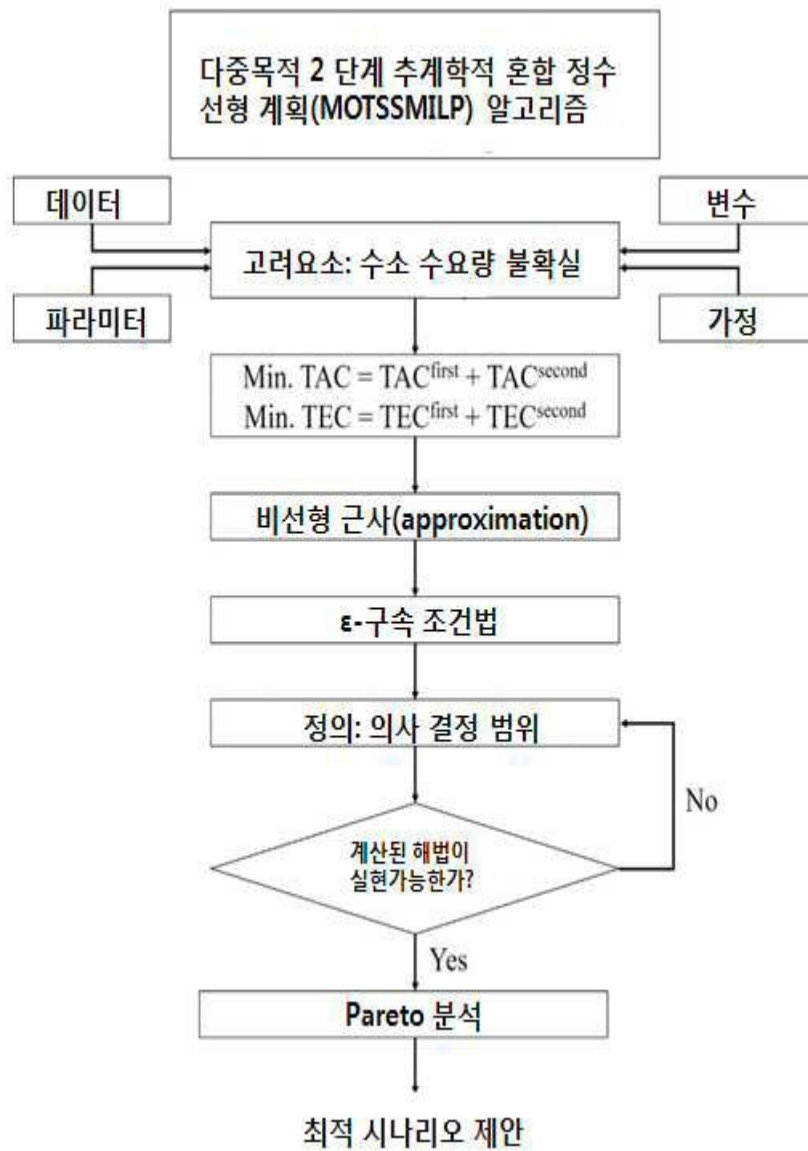
본 발명의 단순한 변형 내지 변경은 모두 본 발명의 영역에 속하는 것으로, 본 발명의 구체적인 보호범위는 첨부된 특허청구범위에 의하여 명확해질 것이다.

도면

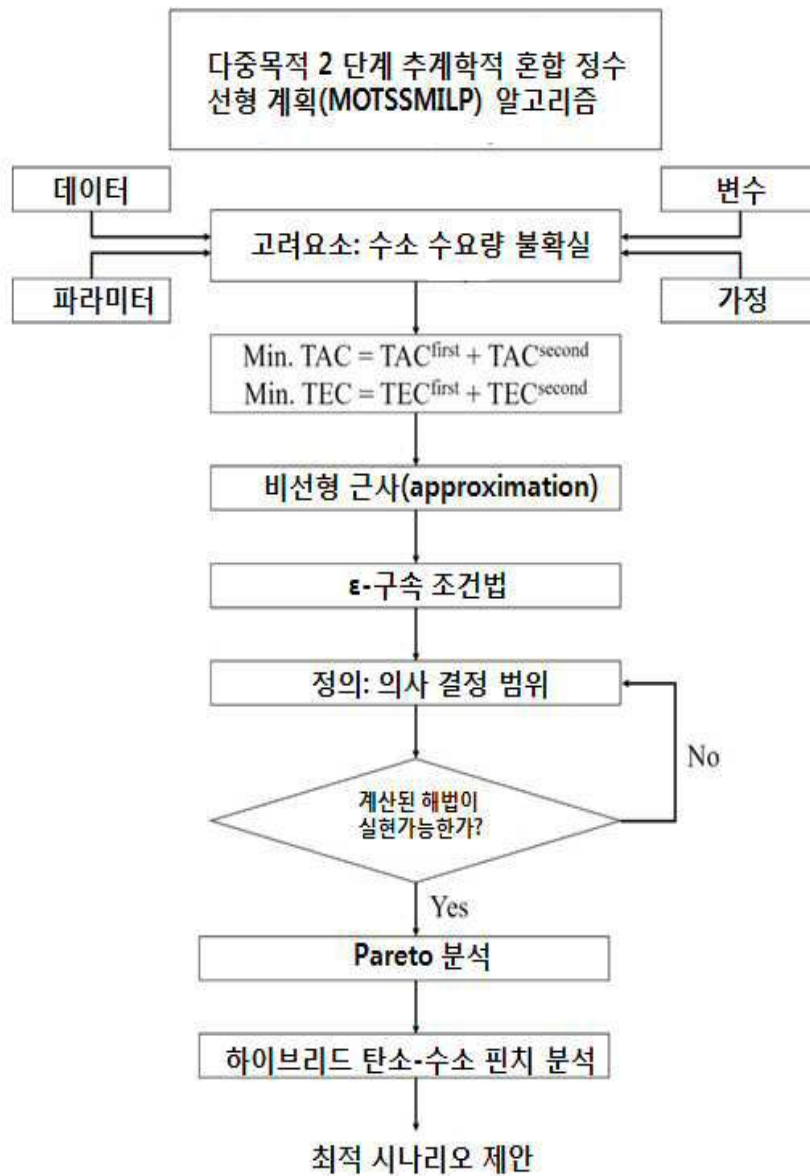
도면1



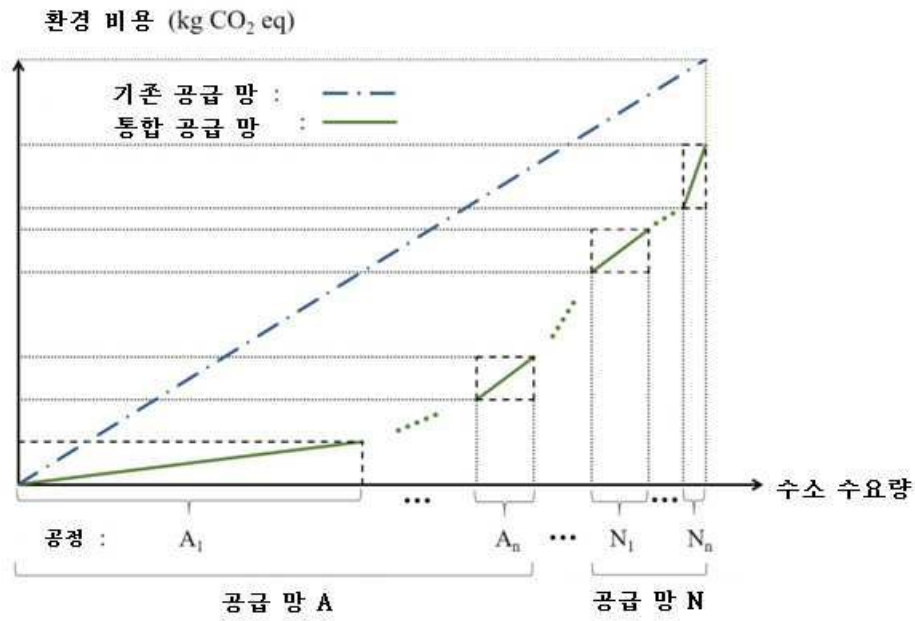
도면2a



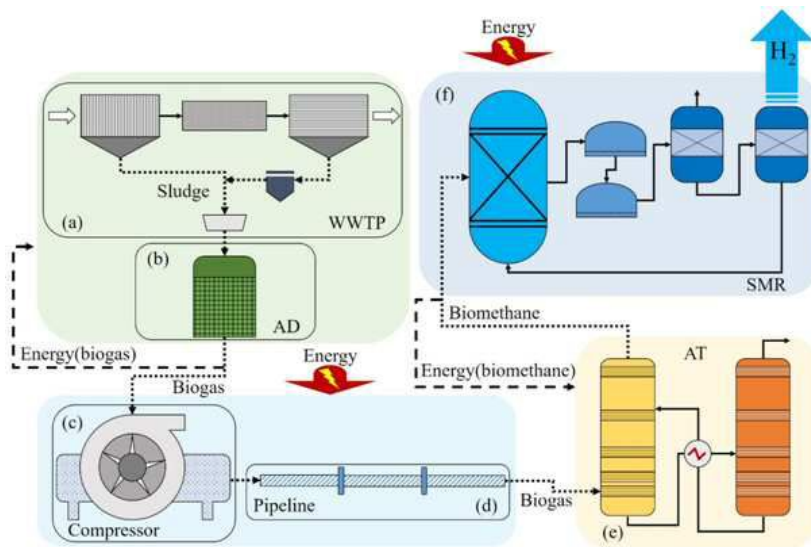
도면2b



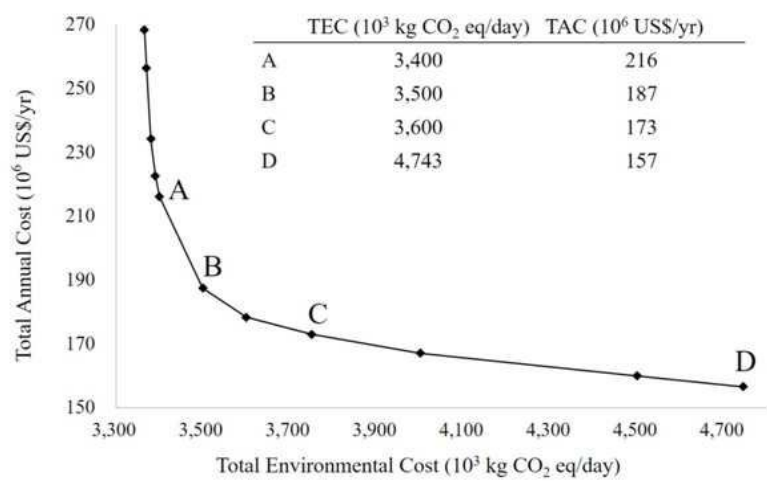
도면3



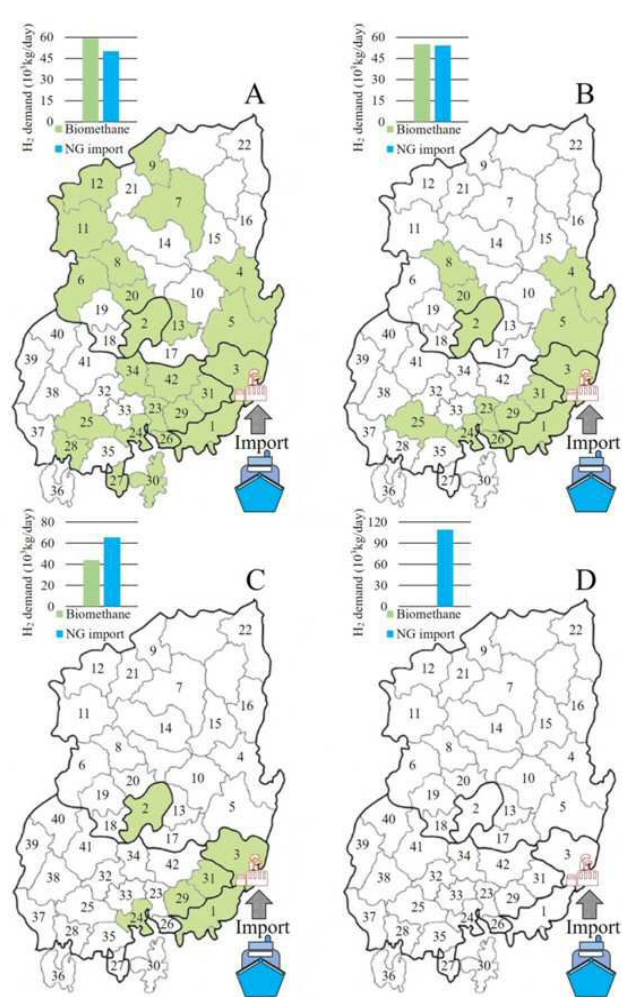
도면4



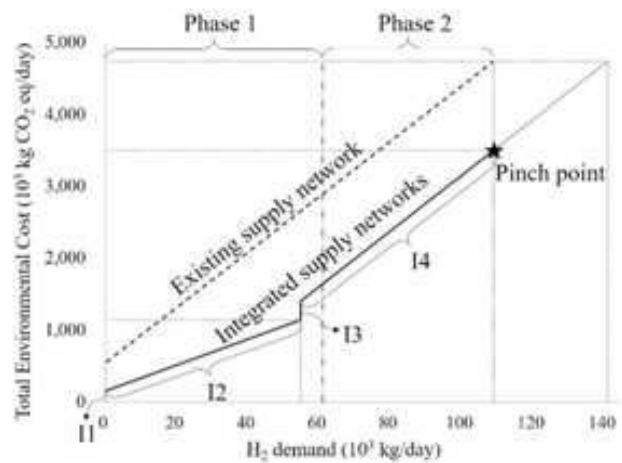
도면5



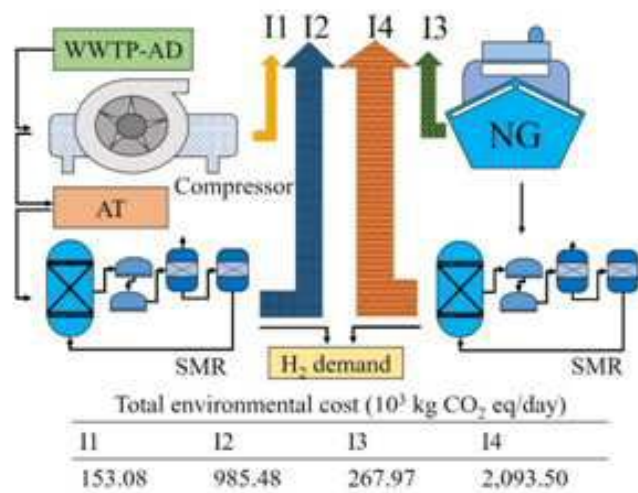
도면6



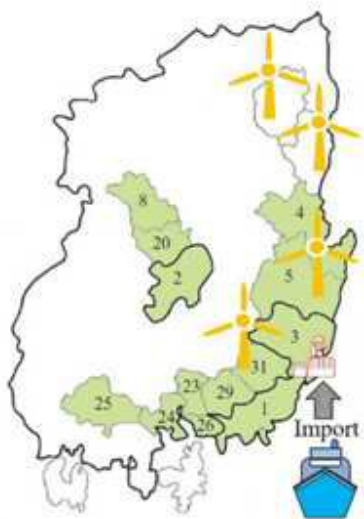
도면7a



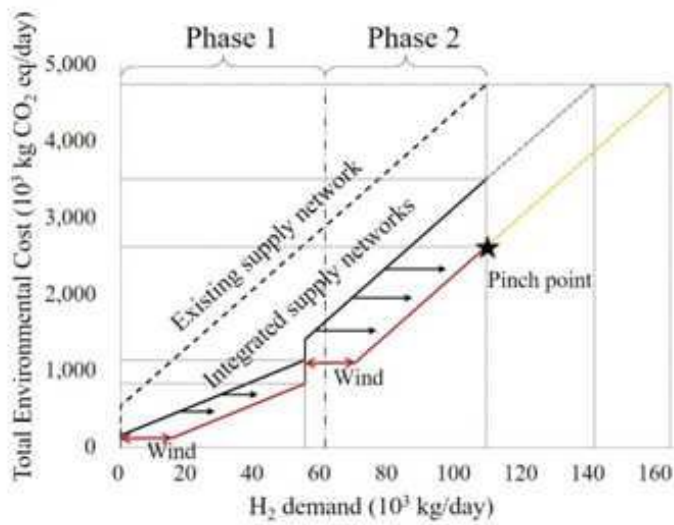
도면7b



도면8a



도면8b



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 제1항 9번째줄

【변경전】

f) 상기 분리된 바이오메탄으로부터

【변경후】

f) 분리된 바이오메탄으로부터